单位代码：**84201**

学　　号：**842010000030929**

中国艺术研究院

2006 届申请硕士学位论文

舞阳贾湖骨笛音响复原研究

学　　科：音乐学

专业方向：音乐声学

指导教师：韩宝强　研究员

作　　者：孙　毅

完成时间：2006 年 5 月

中国艺术研究院●研究生院

2006 年 5 月

中国艺术研究院

2006届申请硕士学位论文

舞阳贾湖骨笛音响复原研究

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行研究工作所取得的研究成果。本人声明：除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表的研究成果，也不包含其他人未获得中国艺术研究院或其他教育科研机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作过的同志对本研究所做出的任何贡献已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名　　　　　　　　　　签字日期：　　年　　月　　日

学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解中国艺术研究院有关保留、使用学位论文的规定，即中国艺术研究院有权保留并向国家有关部门或机构交送本院博士、硕士论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权中国艺术研究院可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索。可以采用影印、索引或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

学位论文作者签名：　　　　　　　　导师签名：

签字日期：　　年　　月　　日　　　签字日期：　　年　　月　　日

学位论文作者毕业去向：　　　　　　电话：

工作单位：　　　　　　　　　　　　电子邮件：

通讯地址：　　　　　　　　　　　　邮编：

中文摘要

舞阳贾湖骨笛发掘出土在考古学和音乐学研究上具有空前的学术价值。它的出土将学术界普遍认为中华音乐文明起源的时间，从公元前3000年传说中的黄帝时期提前至公元前7000年至公元前5000年新石器时代中晚期。遗憾的是，自骨笛发现的二十多年以来，学术界对它的研究却并没有达到应有的深度。最主要的原因在于，骨笛经历数千年的埋葬，已经大量破损。近年来，考虑到骨笛的重要文物价值，国家文博部门已经开始对骨笛进行系统、妥善的保护工作。毋庸置疑，对骨笛的保护非常必要，但与此同时骨笛的研究者也失去了深入考查、研究骨笛的机会。骨笛研究资料的严重缺乏，使对其的研究长期处于进展缓慢的状态。舞阳贾湖骨笛音响复原研究通过对贾湖骨笛的逼真复原，不仅能够提供可供研究者使用的骨笛替代品，解决骨笛研究资料缺乏的问题。而且对其吹奏方法、制作过程和音响属性的考查，有利于将骨笛的研究推向新的高度。

贾湖骨笛音响复原研究，笔者主要做了以下几个方面的工作：

全面系统地对有关贾湖骨笛的文献资料加以总结和梳理，为读者提供全面的资料汇总。不仅让笔者对前人的工作有详实、细致的了解，而且便于后人迅速掌握骨笛研究的现状，便于查找相关资料。

由于采用真实鹤骨进行骨笛复原，详尽了解鹤类骨骼的外部结构特征、材料属性以及相关知识非常必要。笔者对骨骼实物进行细致观察的同时，通过大型鹤类相关资料和图片对比，发现制作骨笛的骨材料应该不仅限于丹顶鹤尺骨。其他鹤类，如体型较大的赤颈鹤或体型稍小的白枕鹤、白鹤的尺骨。鹤类胫骨制笛的可能性也不可排除，但需要进一步的调查取证。

由于鹤骨骨管形状天然的不规则性，骨材质的不均质性，必须通过实验得出骨管管长、管径、管材质对骨笛音响属性的影响程度。笔者通过在骨笛近似范围内的相关管长、管径、管材质指标进行音响差异比较实验，发现由于边棱音管乐器的吹奏受诸多人为因素影响较大，其测音吹奏情况非常不稳定。而人为因素造成的差异较管长、管径、管材质所产生的差异大得多，所以排除了骨管形状不规则和骨材料不均质的影响。

骨笛的复原工作按照对鹤骨的破料准备、破料、成型、钻孔四个工序展开。

为了保证复原工作的精度，笔者没有采用古代先民的加工方法，而是采用现代的钻孔机械和切割工具。制成复原骨笛在物理尺寸和外部特性方面和原件相符，且精度较高。获得复原骨笛的音响必须通过测音研究，骨笛作为边棱音管乐器，在测音中有其独特之处。笔者根据边棱音管乐器的发声原理，自行制订了一套系统规范的测音方法，并利用准确度较高的计算机数码测音软件对复原骨笛进行录音和测量，给出了包括波形和频谱在内的、较全面的音响结果。

测音工作所得骨笛的测音结果，对比以往测音研究，存在一定差异。笔者通过分析差异产生的原因，认为复原骨笛由于采用科学化、规范化的测音，且复原精度较高，完全可以替代原件骨笛进行进一步的骨笛研究。

笔者结合音响复原研究的实际工作经验，对骨笛研究中的一些焦点问题：骨笛的音律、M282:20 小七孔问题和演奏方法等，给出自己的见解，希望得到同行指教。

关键词：贾湖骨笛、音响、声学、测音研究、乐器声学、音乐声学、律学、音乐考古学

ABSTRACT

The excavation of Jiahu Bone Flute has the unprecedented academic value in the archaeology and the musicology research. Its unearth revealed the Chinese music civilization origins time must be ahead of 7000B.C to 5000B.C in later Neolithic period , not the time in fable Yellow Emperor time of 3000B.C as the academic circles generally considered. The research had not actually reached a very deep level during the past 20 more years since the bone fluted had been discovered first time. The main reason lies in: after thousands years' burying, the bone flute already had been heavily damaged. Considered the importance of cultural relic value, the national administration of cultural heritage and museum department already implemented the properly protection to the bone flute. Without any doubt, it is extremely essential to protect the bone flute, while the flute researchers also lost the opportunities of doing any advanced research. For a long time the research is under a very slow progress due to the lack of relative material of bone flute. The research of sound reconstructing of Jiahu Bone Flute is not only providing an substitute which uses for researchers through the flute clearly reconstructing, to resolve the research material deficient problem, moreover the studies of playing method, manufacturing process and acoustic attribute, will raise the research to a brand new step.

Here are the main aspects regarding the research of sound reconstructing of Jiahu bone flute that the author has been done:

To provide a comprehensive and detailed picture of Jiahu bone flute by classifying and summarizing the existing literature materials, this research is not only have author to clearly understand the predecessor's work, moreover is to make other people would rapidly grasp the present situation of the bone flute studies and to search the correlation data more efficiently.

Because of using the real crane bone to perform the bone flute's reconstructing, understanding crane skeleton exterior structure, material attribute and relative knowledge became extremely important. By studying the real crane skeleton, through searching related materials and comparing pictures, the author discovered it is not only restricted in the red-crowned crane ulna, other cranes, the larger size such as red neck crane and the smaller

size such as white-nape crane and white crane's ulna. The possibility that the crane shinbone making flute may not excluded, but needs further investigation.

As the crane bone tube shape's natural irregularity, the material's heterogeneous, it is necessary to obtain the influence as bone tube length, diameter, material and the bone flute sound attribute through lab testing. After many comparing experiments of the indicators as tube length, tube diameter, tube material, the author discovered the edgetone wind instrument would be mainly affected by human factor, such as the sound ranging playing instability. The human factor caused distortion is much higher than other indicators as tube length, tube diameter and material, whereas the effects from indicators of irregular tube shape and uneven bone material will be ignored.

The bone flute reconstruction is following four steps: pre-crafting, crafting, modeling and drilling hole. To ensure the reconstruction's precision, the author has not used the ancient processing method, but uses modern drilling machinery and cutting tools. The copy of bone flute matches the original flute's physical size and external attributes. It is necessary to pass the tone test for bone flute's acoustic reconstruction. As one of the edgetone wind instruments, the bone flute has some unique points at tone testing. The author has drawn up a set of standard tone testing according to the theory of edge tone wind instruments' vibration, utilized accurate computer numerical code sound tone testing software as the main method recorded, tested the reconstructed bone flute, received including wave profile, frequency spectrum, and more comprehensive acoustic result.

There are certain discrepancy between the tone results of the reconstructed bone flute and the pass tone results of the bone flute. The author analyzed the discrepancies are result of many factor and found the research value of reconstructed bone flute's cannot be denied. Just the opposite, since the reconstructed bone flute utilized scientific and standardized tone testing process and it has higher precision, so the author consider that reconstructed bone flutes definitely may substitute the original part to conduct further bone flute research.

Regarding the bone flute research in focal points: like the temperament of bone flute, the flute M282:20 small seven orifices, the performance method and so on. The author unifies the acoustic reconstructing hands on experience, produces some unsophisticated opinion, shares with colleagues.

Key words: Jiahu bone flute, Sound, Acoustic, Tone Testing, Instrumental Acoustic, Musical Acoustic, Temperament, Musical Archaeology

目录

图表目录

引言

1987年5月在位于河南省舞阳县贾湖遗址发掘现场，考古人员在M282号墓墓主白骨旁发现一支完整无缺的管状骨器，管身上有7个大小完全相同的孔和略小的小孔。经过萧兴华、黄翔鹏、童忠良等音乐学家和考古方面的专家对其进行试奏和测音研究，初步得出结论认为：舞阳贾湖遗址出土的管状骨器是乐器，命名为骨笛。它是我国音乐考古史上出现的最早的吹奏乐器实物；在8千多年前制造出来的骨笛已经具备了音阶概念（慎重起见的最保守结论），也是我国任何典籍上都未见记载的乐器实物[1]

舞阳贾湖骨笛发掘出土在考古学和音乐学研究上具有空前的学术价值。它的出土将学术界普遍认为中华音乐文明起源的时间，从公元前3000年传说中的黄帝时期提前到公元前7000年至公元前5000年新石器时代中晚期。而且在音阶发展史、乐器发展史、古代先民的音准感觉、古代声学发展、古代科学技术发展以及古代工具制作和工艺等方面的研究空间得到了空前拓展。

自首支骨笛被发现后，陆续发现骨笛达25支，通过碳十四所测定骨笛制作年代从公元前5千年-公元前7千年长达数千年的时间[2]。大量存在的考古实物证明骨笛在古代先民音乐生活中占相当重要的位置。它亦无疑成为今人考查新石器时代中原音乐文化的最佳窥镜。黄翔鹏《舞阳贾湖骨笛的测音研究》[3]首次披露骨笛发掘情况和测音成果，骨笛发掘和深入研究引起了众多专家学者的重视，并相继发表具相当影响力的学术论文。1999年随着河南文物考古研究所编著《舞阳贾湖》考古报告正式出版与舞阳贾湖骨笛研究现状及测音结果在《Nature》[4]发表，国内外学者和科学家纷纷开始将关注的焦点对准这一目前世上现存最早尚可以演奏的乐器。

舞阳骨笛经历近万年地下埋藏，出土前已经大量破损、变质。加上骨笛出土时各方面保护条件限制和考古发掘研究不可避免的人为破坏，大多数骨笛出现不同程度破损。考虑到骨笛重要文物实物价值，舞阳骨笛已经由相关文博单位收藏

[1]萧兴华 《中国音乐文化文明九千年——试论河南舞阳贾湖骨笛的发掘及其意义》2000年3月 第一期

[2]河南省文物考古研究所《舞阳贾湖》 科学出版社 1999年

[3]黄翔鹏 《舞阳贾湖骨笛测音研究》,《文物》1989年第一期 （《音乐学文集》）

[4] JUZHONG ZHANG、 GARMAN HARBOTTLEN、 CHANGSUI WANG、ZHAOCHEN KONG 《OLDEST PLAYABLE MUSICAL INSTRUMENT FOUND AT JIAHU EARLY NEOLITHIC SITE IN CHINA》,《Nature》, vol401 23 September 1999 www.nature.com

保护。作为新石器时代中原音乐文化 “活化石”的舞阳贾湖骨笛，目前却由于研究材料和测音数据的缺乏，研究的开展遇到前所未有的困难。发掘的25支骨笛，其中较为完整的不超过10支，曾进行过测音研究的也仅6支。从研究数量上尚远远不够。况且早期发表的这些测音数据，由于当时技术手段、数据采集方法和研究时间等方面限制，无论是数据的准确性和规范性都未得到保证，远远不能满足目前研究者的需要。

本研究通过对骨笛制作材料和精密尺寸复原，采用科学的管乐器测音方法，力图将贾湖骨笛音响还原到原始状态。这样不仅可以补充多年来骨笛研究材料的缺乏，而且为音乐考古学、科技考古学、音乐史学、乐器学等相关学科研究提供重要实物和音响参考。同时在骨笛复原过程中，提高对贾湖骨笛认识和研究

本文共分6章，第一章介绍中、外有关舞阳贾湖骨笛研究成果和相关论文，按照时间进行分类。第二章至第四章为全文的主体。其中第二章介绍骨笛复原音响研究的意义和缘起，包括研究方法的构思和确定过程。第三章介绍复原骨笛的制作材料—丹顶鹤骨骼的相关情况。第四章复原制作的前期准备实验，确定复原骨笛音响属性对骨管管长、管径误差的敏感度。第五章陈述复原骨笛过程和制作过程中出现的问题。第六章对骨笛测音过程中的方法选择和测音规范进行总结。第七章从复原骨笛测音数据所传达的信息展开讨论，针对复原骨笛的准确性、骨笛音律、演奏法等相关问题。

第一章 舞阳贾湖骨笛研究综述

第一节 国内学者对舞阳贾湖骨笛的研究

早在发掘初期，黄翔鹏和萧兴华曾对少数几支骨笛进行研究。1987 年黄翔鹏对 M282:20 骨笛测音后，在《文物》1989 年第一期发表的《舞阳贾湖骨笛的测音研究》(黄翔鹏，1989)。其中将他和萧兴华等多位专家和工程师测音得到的结果公布于众。这是关于贾湖骨笛音乐研究的最早且最重要的研究论文之一。

黄翔鹏和萧兴华以及童忠良等多人共同参加了这次测音工作。此次测音所用设备是闪光频谱测音仪，测量对象是 M282:20 号骨笛，由萧兴华、徐桃英采用上下行连续的吹奏方式进行。考虑到误差存在，对测量数据采用多次测量取平均值的方法，即连续上或下行为一组，分别测量八组求平均值，以得到较为可信结果。针对 M282:20 上小七孔的存在，其中两组数据单独测定小七孔音高，以求全面。通过测音结果的乐律学分析，结合古代文献中关于笛类乐器的记载，黄翔鹏认为 M282:20 骨笛至少应该可以演奏六声音阶结构，七声下徵调音阶或清商音阶也有可能。对于小七孔功能问题，黄翔鹏猜测应为制作骨笛完毕后补开的孔，用以调节整管的发音，即为调音孔。对于此出土骨器命名，黄翔鹏指出“如求文献之证，考乐器名，以最自然、最简单的命名称‘笛’即可”，之后“骨笛”命名沿用至今（黄翔鹏，1989）。

黄翔鹏 M282：20 骨笛测音数据发表之后的几十年间，音乐界骨笛研究基本依靠此组数据开展，至今仍是被广泛引用的骨笛测音数据之一。

1989 年河南文物考古所在《文物》1989 年第 1 期发表《河南舞阳贾湖新石器时代遗址第二至第六次发掘简报》[5]，对 1987 年至 1989 年间的考古发掘工作和成果加以总结。其中在骨笛描述部分，详细公布已发掘的骨笛相关情况和图片资料，但未见其他音乐相关的新材料。

1991 年吴钊发表《贾湖龟铃骨笛与中国音乐文明之源》[6]于《文物》第三期。戴念祖在其《中国、希腊和巴比伦：古代东西方的乐律传播问题》[7]的参考文献

[5]河南省文物考古研究所《河南舞阳贾湖新石器时代遗址第二至第六次发掘简报》《文物》1989 年 第一期
[6]吴钊 《贾湖龟铃骨笛与中国音乐文明之源》《文物》1991 年 3 期
[7]戴念祖 《中国、希腊和巴比伦：古代东西方的乐律传播问题》 《中国音乐学》 1993 年第三期

中评论吴钊的《贾湖龟铃骨笛与中国音乐文明之源》一文时曾说“其关键处于理不明，四则运算大概也不适宜古代贾湖人”。

结合《河南舞阳贾湖新石器时代遗址第二至第六次发掘简报》所公布的资料与数据，童忠良经过多年对骨笛的仿制模拟研究，在 1992 年《中国音乐学》第三期上发表《舞阳贾湖骨笛的音孔设计与宫调特点》[8]。童以 M282:20、M282:21、M78:1 为对象，从资料公布的孔距尺寸入手展开研究。其中借鉴现今民间存在的某些吹管乐器的孔距设计规范，即七孔管乐器的孔距应以四孔为中点，分为“上身（距头部）”和“下身（距尾部）”，再以第七孔为下身的中点，第一孔为上身的中点，分出上身前段、上身后段、下身前段、下身后段。依据苗族民间竖吹管乐器的制作规范：上身与下身等长；各相邻近音孔的间距大体相同；7 孔音与第 1 孔所发的音呈八度关系等。童经过计算认为，就目前已有数据的三支骨笛尺寸看，孔距设计基本符合这一规则。其中 M282:20 骨笛误差较大问题，童认为正是由于该骨笛尺寸比例误差过大，才开小七孔加以校正。由此可见，童忠良在小七孔功能问题上和黄翔鹏基本意见一致。此外，童认为“特殊小孔有强调第 1 孔与第 7 孔八度关系的实践意义”（童忠良，1992）。由于当时缺乏六、八孔骨笛数据，所以童在论述偶数音孔的骨笛时，大胆假设其开孔规则，但童特别指出需要其余骨笛资料的公开加以检验和证实。

在论述骨笛的宫调特性时，童忠良引入统计学的方差和离散系数对测音数据进行处理，从方法上较黄翔鹏更加科学和规范。对于处理后的结果，运用童忠良多宫系统乐律学理论加以分析，指出多宫演奏的可能性。在音阶结构上童忠良认为存在六声七声清商音阶、六声七声古音阶、六声新音阶多种可能性，大胆地从理论上扩充了舞阳贾湖骨笛可能的音阶形态。

虽然受文章发表时骨笛考古材料的局限，童忠良提出的孔距设计方案和其后实际出土骨笛开孔尺寸出入较大。童忠良这篇论文中对比现有民间管乐器音孔设计方法，探求骨笛的开孔方式，为研究骨笛开创了新思路。对模拟考古和骨笛修复以及了解骨笛音响特性都有较高的价值。

河南文物考古研究所的张居中作为舞阳贾湖遗址考古发掘的亲历者，先后在 1987 年《中国文物报》上发表《八千年前七孔骨笛和甲骨契刻符号在河南舞阳

[8]童忠良 《舞阳贾湖骨笛的音孔设计与宫调特点》 《中国音乐学》1992 年第 3 期

出土》[9]，1988 年《音乐研究》上发表《考古新发现——贾湖骨笛》[10]，1991 年《华夏考古》第 2 期上发表《舞阳贾湖遗址出土的龟甲和骨笛》[11]，多篇论文从不同角度论述舞阳贾湖骨笛的出土情况、形制等相关情况。除此以外他在《“中国第一笛”发掘认识经过》[12]（《光明日报》1993 年 3 月 28 日第六版）中将舞阳贾湖骨笛这一重大考古发掘报道给全国人民。

中国科学院自然科学史研究所戴念祖在《中国、希腊和巴比伦：古代东西方的乐律传播问题》一文中援引黄翔鹏的文章，给予贾湖骨笛高度的评价。认为贾湖骨笛是中国乐律的起源，佐证古代东西方乐律传播关系。（戴念祖，1993）

1996 年刘正国在《音乐研究》上发表《笛乎 筹乎 龠乎——为贾湖遗址出土的骨质斜吹乐管考名》[13]，文中对黄翔鹏对骨笛的命名提出异议。刘正国通过整理有关文献，比较 “筹”，“篍”，“笛”，“龠”以及其它相关的管乐器的特点。刘认为从贾湖骨笛测音实践来看，其吹奏方法和“筹”有相似之处，同为向一侧偏斜 45° 斜吹法。依据殷墟甲骨文中关于“龠”的考证，刘正国认为骨笛应该定名为“骨龠”，而不是黄翔鹏在其文中提到的“骨笛”。在以后世现存乐器推测骨笛的命名和分类问题上，刘正国提出了自己的看法。

北京联合大学陈其翔在 1999 年《音乐艺术》上发表《舞阳贾湖骨笛研究》[14]，研究对象为 M282:20 骨笛，着重关注骨笛的开孔和律制问题。陈在文中提出先民选择律制应依靠自然原则、协和原则、简洁原则，并认为先民容易发现的自然律应为泛音列和等距律。基于以上前提，陈文中判断鹤类尺骨应该就是古代一尺，约 25cm。先民骨笛的开孔设计应为第一孔位置为一个食指的距离，第一孔距离和第七孔之距离为一食指距离的 1.5 倍。然后将第一孔和第七孔之间的距离等分为六份，最后得到等距的七孔骨笛。

1999 年对贾湖遗址的研究得到中国国家社会科学基金项目、国家自然科学基金项目赞助，其考古发掘报告及研究成果编撰成《舞阳贾湖》[15]一书，全书共二百多万字，由科学出版社出版发行。作为考古研究的总结性报告，书中将舞阳

[9]张居中 《八千年前七孔骨笛和甲骨契刻符号在河南舞阳出土》 《中国文物报》1987 年 12 月 11 日
[10]张居中 《考古新发现——贾湖骨笛》 《音乐研究》1988 年 4 期
[11]张居中 《舞阳贾湖遗址出土的龟甲和骨笛》 《华夏考古》1991 年第 2 期
[12]张居中 《“中国第一笛”发掘认识经过》 《光明日报》1993 年 3 月 28 日第六版
[13]刘正国 《笛乎 筹乎 龠乎——为贾湖遗址出土的骨质斜吹乐管考名》 《音乐研究》1996 年 6 月 第三期
[14]陈其翔 《舞阳贾湖骨笛研究》 《音乐艺术》上海音乐学院学报 1999 年 04 期
[15]《舞阳贾湖》河南省文物考古研究所编著 科学出版社 1999

贾湖地区的地理自然环境、历史发展、生物种群情况和遗址的发掘过程、出土文物情况等作了详细的记录和论述。第六章《遗物》第四节从考古学的角度分析骨笛器物的出土情况。其中从埋葬状况、共出器物、随葬骨笛者的年龄与性别三个方面记录了骨笛出土的概况；以开孔数和完整程度为分类依据详细记录了出土的25支骨笛的外观和规格，并附有12支骨笛的线描图；鉴定骨笛的制作原材料为丹顶鹤尺骨，推断其制作工艺有截去骨关节、设计孔位、钻音孔、调音成器的程序，并根据对骨笛的观察，理性地推断了各程序相关的问题。

作为乐器方面专题研究，《舞阳贾湖》第九章《骨笛研究》由曾亲身参与多次骨笛发掘和测音工作的萧兴华执笔。系统地总结介绍1987-1994年以来发现的多支骨笛的情况。着重在骨笛的历史分期、骨笛测音研究、音序列的变化发展、骨笛制作过程的推测等方面对保存较为良好的少数几个骨笛进行分析。对所有骨笛进行历史分期的同时，还给出其中较为完整的11支骨笛和1支河南汝州博物馆的中山寨十孔骨笛的1:1图样，并总结了截止到1994年的四次测音工作和六支骨笛的测音数据。结合它们的历史分期和测音数据，萧兴华认为从骨笛上反映出来自然音序的变化发展正是音阶结构发展的体现，并且这些音阶和现存民歌音乐的音阶有着千丝万缕的联系。舞阳贾湖骨笛所反映出来音乐音阶变化，正是那个时期音乐文化发展水平的体现。对于不同骨笛在音程关系中所反映出来的情况看，萧兴华认为我们虽然不知道舞阳人是否已经明确律的概念，但在音程关系排列上骨笛已经兼有纯律、五度相生律、十二平均律的因素。而且认为在贾湖音乐文化中，纯律和十二平均律的因素占有重要地位。对于骨笛制作过程，萧兴华根据给出六支骨笛音孔的孔距数据，认为骨笛开孔还是更多的采用经验的方法。

《舞阳贾湖》一书中所载M341:1、M341:2、M282:20、M282:21、M253:4五支骨笛的测音数据均为1992年6月在郑州测音的结果，M78:1为1994年在北京中国历史博物馆测音数据。虽然没有收录黄翔鹏等在1989年首次对M282:20骨笛测音的结果，但所用测量设备、方法和程序基本相同，即采用Stroboconn闪光频谱测音仪，由萧兴华、徐桃英用竖吹法连续音上下行测量，多次测量取平均值。测音过程中不同的骨笛测量次数不相同。如M341:1、M341:2和M253:4上下行只测量了两次，而M282:20较黄翔鹏的测音多了四次上下行，并特别标注了“堵小七孔”和“开小七孔”的测量。M282:21则仍上下行测量四次。1994年在中国

历史博物馆测量 M78:1，仅仅记录了一次下行和上行 $\dot{2}$ 孔的数据。测量次数的不统一，笔者妄度应与骨笛损伤状况有关。个别骨笛骨质已经风化严重，吹奏过程中恐多次测量造成进一步破坏。同时笔者也发现 M282:20 的测音数据和黄翔鹏所测数据大体相合，但个别音横向比较最大偏差超过 100 音分。

2000 年萧兴华再次发表论文《中国音乐文化文明九千年——试论河南舞阳贾湖骨笛的发掘及其意义》（萧兴华，2000）于《音乐研究》从古代音乐文化发展的角度介绍 1987-1994 年以来发现的多支骨笛的情况。文中概括的阐述了贾湖遗址的地理位置和自然环境，并详细地描述了 M282:20 以及其他骨笛的发掘出土过程和进展。萧兴华在文中始终把骨笛的发掘和中国古代音乐文化文明的发展联系在一起，指出对贾湖骨笛的深入研究其目的是寻找中国音乐形成和发展变化过程。文中还就目前出土的骨笛按历史分期划分为早期、中期、晚期，并依据不同的历史分期，将保存完好的六支骨笛测音分析结果即骨笛的音阶和调高公之于众，且进一步探讨其数与律。认为在九千年前，贾湖人已经具有对十二平均律某些因素的认识，针对骨笛的制作，萧兴华对贾湖人数的能力给予高度评价。从二十多支骨笛的开孔来看，都没有采用完全等分的计算方法，对于这样的复杂制作，贾湖人实践不得不说是一种奇迹。骨笛中制作最为精美的 M341:2 号骨笛，萧兴华对比同一墓穴中另一支 M341:1 号骨笛标本进一步说明它们在音阶结构上的不同，以此说明骨笛在改造过程中所具有的进步性与正确性，认为骨笛沿革是最早的乐器改良过程。最后也提出一些目前仍未知的问题，如 M253:4 号骨笛上的符号代表什么？贾湖人又是怎样在骨笛这种坚硬材料上钻出如此精美的音孔？这些问题都值得我们深入思考。

2000 年舞阳贾湖骨笛乐曲《巫之舞》作者荣郑撰写《舞阳骨笛吹奏方法初探》[16]发表于 2000 年《黄钟》增刊。针对一直以来关于骨笛演奏法方面的争论，文中结合作者从事骨笛演出的经验认为：正竖式吹奏法和斜竖式吹奏法各有其吹奏方面的优势。正竖式由于精细的“口锋”和气流的锐利，演奏半音是有优势的，而斜竖式虽然有不受骨笛吹口形状的限制，且进气量大、声音厚等优点，却也有角度控制、气息控制的难度，特别是在低音区和吹奏半音时。文中指出开封“相国寺”佛教乐谱中记载的“筹”和骨笛的渊源关系，认为从乐器构造、发音原理

[16]荣政 《舞阳骨笛吹奏方法初探——兼谈“筹”与舞阳骨的比较》 《黄钟》武汉音乐学院学报 2000 年增刊

和吹奏方法上，二者都具有惊人的一致性。

2002 年第 4 期《考古与文物》刊登了洛阳市文物考古队王丽芬《贾湖出土骨笛及相关问题》[17]的文章。作者通过对《舞阳贾湖》考古报告中所记录的墓葬情况、骨笛出土分布等情况进行统计后，认为骨笛在新石器时代先民生活中占有重要的地位。并指出骨笛应为少数人所有的特殊器物，这些人是一群具有相当高音乐知识、掌握较高制作工艺的“音乐人”而非“巫师”。骨笛应该有更长的发展历史，简单地认为贾湖骨笛是“中国音乐文明之源”的说法，王认为有待进一步考证。

2002 年中国科学院声学研究所陈通和中国科学院科学史研究所戴念祖通过对《舞阳贾湖》考古报告中公布的舞阳贾湖骨笛尺寸数据进行理论计算方法，估算出五支骨笛的理论估算结果。并撰写论文《贾湖骨笛的乐音估算》[18]发表于《中国音乐学》2002 年第 4 期。其中将骨笛近似为从吹口起的筒形管和在开口端的锥形管组成的复合管，以相类似唢呐的吹口校正和音孔校正方法结合管乐器频率计算公式加以估算。虽然估算结果和考古报告中测音结果除 M341:1 号骨笛以外都有小幅差异，但作者通过逐个分析误差产生的原因。认为估算数据是测音吹奏的有力参考，如偏差过大，则可认为测音演奏非常态。

2003 年中央音乐学院的郑祖襄教授针对萧兴华关于骨笛的文章，在《关于贾湖骨笛测音数据和相关论证问题的讨论》[19]一文中提出一些不同的看法。郑祖襄认为萧兴华在测音数据的采集和处理上尚有不妥之处，例如仅仅六支骨笛的测音数据就存在测音工作的不统一，其中 M282:20 测音数据最多，而 M78:1 号骨笛却只有一组数据，而且骨笛测音工作和修复工作都很大程度上受到人为因素的影响，但这些问题在萧兴华对测音工作的论述上却没有记载。测音数据的相对缺少也是郑祖襄提出的另一个重要问题。郑在骨笛音阶问题上也提出了自己的看法，认为萧兴华文章中提到多支骨笛音阶问题尚有疑点，且在调高问题上亦有多处值得商榷。对于平均律问题，郑祖襄认为：“以二十六支骨笛中的一支来说明平均律的存在，根据不够充分；细小的音分变化必然带来尺寸设计上的细小误差容错，况且加上管律中的管口校正，计算的复杂程度和精度要求很高，对贾湖人不太适

[17]王丽芬（洛阳市文物考古队）《贾湖出土骨笛及相关问题》 《考古与文物》2002 年 4 期

[18]陈通、戴念祖 《贾湖骨笛的乐音估算》 《中国音乐学》2002 年第 4 期

[19]郑祖襄 《关于贾湖骨笛测音数据及相关论证问题的讨论》 《中国音乐学》2003 年 03 期

宜，再加上平均律是人类通过音乐实践，运用理性计算而求得，对于远古的贾湖人就更不适用。”（郑祖襄，2003）

2003年夏季、徐飞、王昌燧《新石器时期中国先民音乐调音技术水平的乐律数理分析——贾湖骨笛特殊小孔的调音功能与测音结果研究》[20]发表于《音乐研究》。针对M282:20标本的小七孔问题深入的进行研究。长久以来对于M282:20等标本上的特殊小孔问题，学术界一直存在争议。黄翔鹏认为小七孔应为七孔调音而后开，而萧兴华则认为小七孔应为先开，孔位过高才在正确位置开正式七孔。作者针对这一争议，通过对M282:20两次测音数据汇总和校对，结合动、静态测音稳定性分析，得出结论：特殊小孔具有调节7孔音高；调节骨笛音阶关系；改善骨笛音准；使骨笛较为容易实现旋宫转调。笔者认为文中作者思路清晰，所采用方法亦较为客观，汇校数据和结论的论证充分。在汇校所用测音数据本身的准确性得到保证情况下，对于小七孔的认识能够成立。

徐飞、夏季、王昌燧《贾湖骨笛音乐声学特性的新探索——最新出土的贾湖骨笛测音研究》[21]一文，在2004年第一期的《音乐研究》上发表。文中介绍了贾湖遗址第七次考古发掘中骨笛标本M511:4的尺寸、测音数据和演奏方法等研究成果，其中还包括测音环境和骨笛修补的情况。作者认为骨笛是可以演奏两个八度的实用乐器，其中高八度是通过演奏者的控制激发谐音列中的二次谐音；大多数骨笛可以演奏七声音阶且音准较好；骨笛的吹奏方法应为斜吹，这样可以产生音量更大、音色更好、易于演奏的笛声，且可以吹奏高八度音。

2003年5月夏季在其导师王昌燧、徐飞的帮助下完成硕士论文《中国原始音乐声学成就数理分析——贾湖骨笛研究》[22]中将以上两文加以总结。值得一提的是，夏季采用骨笛塑料模型对骨笛进行模拟测音实验，并以模拟实验得出的结果系统分析了骨笛的沿革发展过程，认为指法的运用对于骨笛的发展起了至关重要的作用。

2005陈其射于《天津音乐学院学报》2005年2期发表《河南舞阳贾湖骨笛音律分析》[23]。针对《舞阳贾湖》考古报告中测音数据的不准确和不规范，陈认

[20]夏季、徐飞、王昌燧《新石器时期中国先民音乐调音技术水平的乐律数理分析——贾湖骨笛特殊小孔的调音功能与测音结果研究》《音乐研究》2003年第1期
[21]徐飞、夏季、王昌燧《贾湖骨笛音乐声学特性的新探索——最新出土的贾湖骨笛测音研究》《音乐研究》2004年01期
[22]夏季《中国原始音乐声学成就数理分析——贾湖骨笛研究》中国科技大学硕士论文 2003年5月
[23]陈其射《河南舞阳贾湖骨笛音律分析》《天津音乐学院学报》2005年2期

为以此判断骨笛音阶构成和乐律情况的根据不充分。从周边文化的发展情况和人类文明发展总体规律来看，骨笛的制作工艺应在经验的、直观的、整体把握的方法下产生，而非理性精确计算产物。结合对“上古造律”的含义理解，陈还指出骨笛的制作应该是“比物刻痕”。比物刻痕和开孔必然产生一定的误差，如果以骨笛平均孔距为比物物长，则骨笛应该是匀孔笛，即头端至各孔距离数学表现为等差数列。陈认为匀孔笛的音律应为自然实践律，并引用古文献和乐器音律以及民歌音律等加以验证。

2005 年《天津音乐学院学报》第 2 期发表李寄萍《骨笛仿古实验和分析推测》[24]。文中认为“对骨笛科学的仿古实验及分析推测，无疑是现代人研究昔年的好方法之一”（李寄萍，2005）。作者以多年制笛箫、吹笛箫的经验，用温州本地火鸡的长腿骨，根据《新石器时期中国先民音乐调音技术水平的乐律数理分析》一文中引用《舞阳贾湖》考古报告中的 M282:20 骨笛尺寸数据以及《贾湖骨笛音乐声学特性的新探索》文中公布 M511:4 骨笛尺寸，进行仿制。并邀请多人进行吹奏和测音研究。经过实践，作者发现骨笛的吹奏方法中竖吹奏法较斜吹法要容易。而且吹奏仿古骨笛时发现吹奏音高和压唇面积、吹奏角度、气息都有很大的关系，差异较大。找到了各测音研究数据存在较大差异的问题所在。作者还对骨笛的指法做了实测研究，认为“八千年前的贾湖先民已找到相当于今天的七声自然音，并应用于骨笛制作和演奏”。另外对于骨笛在功用问题，作者也提出，先民应该主要使用七孔骨笛，而其他孔数骨笛应为“练习笛、狩猎笛、陪葬笛”。

2005 年郑祖襄在《音乐研究》第 4 期上再次发表文章《贾湖骨笛调高音阶再析》[25]。文中指出骨笛音阶研究应该以确定调高为首要问题。虽然作者仍认为骨笛测音数据相对缺乏是进一步准确研究骨笛音阶问题的重要障碍，但作者还是就目前所测得数据，提出贾湖骨笛调高和音阶方面的看法。作者认为虽然骨笛长短不一、筒音不一致的情况，使贾湖骨笛有可能存在不同的调高，但从测音情况来分析，D 调高在骨笛上仍存在一定普遍性。就目前七支骨笛测音结果来看，“笛体角声”或“笛体清角”（郑祖襄，2005）已有实践证明。作者经过一系列的分析和推断，得出包括 M511:4 骨笛在内的七支贾湖骨笛可能存在三种调高和四种调式的结论。但作者出于谨慎，说明此结论仅限于目前七支骨笛。并指出如果要

[24]李寄萍《骨笛仿古实验及分析推测》《天津音乐学院学报》2005 年 2 期
[25]郑祖襄《舞阳贾湖骨笛调高音阶再析》 《音乐研究》2004 年 4 期

得到更准确的数据，有赖于更多骨笛的发掘工作和测音数据的公布。

2006 年天津音乐学院学报《天籁》第一期发表徐荣坤文章《析舞阳骨笛的调高和音阶》[26]，作者在文中对郑祖襄《贾湖骨笛调高音阶再析》所提出贾湖骨笛的调高和音阶提出不同看法。作者认为在没有任何文献典籍和确凿证据的情况下，贾湖骨笛所在的时期应不存在“因调接触而派生的变徵、清商这两种子系音阶”，而仅可能吹奏出“六声或七声自然音阶”。作者通过对包括 M511:4 骨笛在内的七支骨笛的音列分析，证实骨笛应为多种不同宫音位置的四至七声自然音阶。并以此驳斥郑祖襄关于骨笛“D 调普遍性”和“笛体角声”（郑祖襄，2005）的论断。

第二节 国外学者对舞阳贾湖骨笛的研究

对于舞阳骨笛的研究，国外的学者也表现出极大的兴趣。1999 年《OLDEST PLAYABLE MUSICAL INSTRUMENT FOUND AT JIAHU EARLY NEOLITHIC SITE IN CHINA》（JUZHONG ZHANG，1999）一文由中国科技大学科技考古研究室与国外专家 Garman Harbottle 合作撰写，在英国《自然》（Nature）杂志上发表。详细地报道了贾湖骨笛发现的消息，并在其网站上公布了由 M282:20 号骨笛演奏的《小白菜》曲调，从而引起全世界各大媒体的普遍关注。文中详细介绍了 M282:20 的形制、音响、音孔等情况，并对测音数据加以适当分析，是国外文献中最早关于中国舞阳贾湖骨笛的研究报告。随着这篇文章的面世，国外很多民族学、民族音乐学家和社会学家都纷纷以舞阳贾湖的研究成果为材料，分析研究中国的音乐文化历史。但总体而言，国外的学者由于掌握材料有限，尚未对舞阳骨笛做更深层次的研究工作。

面对材料的缺乏，国外学者对骨笛的模拟研究方面做了很多工作。美国加利福尼亚斯坦福大学音乐声学研究中心和中国艺术研究院音乐研究所韩宝强研究员联合发表《WAVEGUIDE SIMULATION OF NEOLITHIC CHINESE FLUTES》[27]，希望能够通过计算机建立一个舞阳贾湖骨笛的数学模型，以此研究骨笛。其中借用现有对笛类乐器的 STK 工具（Synthesis Tool Kit 合成音乐工具包），以吹奏气

[26]徐荣坤 《析舞阳骨笛的调高和音阶》《天津音乐学院学报》2006 年 1 期

[27]Patricio la Cuadra,Tamara Smyth,Chris Chafe,Han Baoqiang 《WAVEGUIDE SIMULATION OF NEOLITHIC CHINESE FLUTES》
http://ccrma.stanford.edu/~tamara/ publications/flute_isma_01.ps

压（边棱音模式）、管口延迟（放射性模式）、非线性影响（口腔共鸣）、音孔设置（涡流噪声）等参数模拟骨笛的音色。再通过人耳的听觉对所用参数加以修正。目前正在对 M341:2 标本做模拟，如果在这支骨笛上参数使用得当，他们下一步希望可以模拟 M282:20 甚至更多有破损的骨笛样本。

从世界音乐的角度上看，世界各国都曾经发现过骨笛，而舞阳贾湖骨笛是目前世界上发现最早、至今尚可以演奏的乐器之一[28]。对于贾湖骨笛的研究不仅让我们了解我国祖先的音乐文化发展水平，更可以和世界其他国家的骨笛研究从乐器音响方面进行比较，或骨笛研究方法上取长补短，相互借鉴、交流，促进世界文化历史发展的研究。

第三节 归纳与分类

截至到 2006 年 3 月，关于国内外骨笛的研究文章已经将近 30 余篇。通过笔者的阅读，笔者分几个方面大致加以总结。

一、贾湖骨笛音阶方面

黄翔鹏在《舞阳贾湖骨笛的测音研究》一文中指出骨笛音阶应该是六声清商音阶或七声下徵调音阶，再无其他可能。在《舞阳贾湖骨笛的音孔设计与宫调特点》文中，童忠良在肯定黄的六声清商音阶可能性的同时，认为七声清商音阶、六声新音阶以及六、七声古音阶也可能是骨笛具有的音阶类型。依当时测音数据，童和黄作出这样的判断不无道理。但骨笛测音的误差和边棱音乐器发声的不准确性来说，笔者认为两位对骨笛音阶的判断还需要更准确、广泛的测音数据加以验证。

郑祖襄在《关于贾湖骨笛测音数据及相关论证问题的讨论》和《舞阳贾湖骨笛调高音阶再析》两篇文章中虽然对考古报告中的测音数据准确性和科学性提出异议，但郑仍以骨笛测音数据对骨笛所传递的音列信息加以总结。郑指出骨笛“所能提供的音乐史信息，主要是调高和音阶”。郑通过对包括 M511:4 骨笛在内的七支骨笛音列逐个分析，依据“笛体角声”的定音规律，得出结论：骨笛应该有

[28] 孙海 《德国出土的“万年骨笛”》 《人民音乐》 2003 年第 10 期总第 450 期

“三种调高，四种音阶”，分别是“C”、“D(或#D)”、“#A(或A)”三种调高，四声音阶、五声音阶、燕乐六声音阶、清乐六声音阶四种音阶。正如郑自己的说明那样，笔者认为，郑祖襄在确定骨笛音阶类型上已经进行非常有益探索，给出了骨笛音阶确定较为明确的思路。不过由于目前骨笛测音研究的准确性和科学性尚存在问题，所以要真正了解骨笛的音阶情况，正如郑所言“还有待更多骨笛的发掘和研究者们的不断努力。”（郑祖襄，2003）

萧兴华执笔的《舞阳贾湖》考古报告第九章《骨笛研究》中，在骨笛音阶方面也提出自己看法。萧从骨笛的自然音序角度，梳理了音阶的发展变化过程。萧通过对测音结果的统计，给出六支骨笛的自然音序情况。并基于不同时期骨笛的自然音序演变和发展，探讨骨笛音阶从简单到复杂，从五声逐渐演变为七声音阶的过程。萧对各时期骨笛音阶类型，都用河南当地民歌对音阶加以验证，从音乐的传承上理解骨笛音阶。笔者认为，萧对骨笛自然音序发展和演变关系进行梳理，有利于了解骨笛这一古乐器的音阶。但用当地民歌加以验证的方法，值得商榷。地方民歌的发展和传承，不仅有纵向继承，而且也有横向的传播。民歌经数千年的传承和传播，其中关系非常复杂，绝非单一的纵向研究那么简单。

二、贾湖骨笛音律方面

骨笛音律方面的探讨中，萧兴华率先在《中国音乐文化文明九千年》对骨笛音律问题提出了看法，认为从骨笛测音来看，骨笛所表现出来的律制情况接近十二平均律。不经如此，萧还在《七千年前的骨管定音器-河南省汝州市中山寨十孔骨笛测音研究》中，通过对十孔骨笛的测音，认为十孔骨笛应该是骨笛的正律器。侧面支持骨笛律制为十二平均律的论断。而郑祖襄 《关于贾湖骨笛测音数据及相关论证问题的讨论》对萧的说法持否定的态度。郑认为：骨笛的开孔和测音准确性不可能达到分析律制的要求。而且人们对律的认识来源于对音乐规律的认识，必然要从简单到复杂，以先民无法认识十二平均律这样一个计算律。萧的论断不符合人类认识的音乐和律学的规律。笔者倾向于郑祖襄的意见。需要补充的是，律制的准确性和变通性之间存在辩证统一关系，用个别测音数据加以确定，值得商榷。

此后陈其射在《河南舞阳贾湖骨笛音律分析》一文中也指出，骨笛作为尚处

于蒙昧状态的舞阳人制作出来的乐器，不可能依据明确的乐律思维，而只能出于朴素的听觉自觉。文中陈认为，古人制作骨笛应该采用“比物刻痕”方式，而制作尺寸比例的选择则应该是孔距呈等差数列的匀孔笛。这一制作原则所产生的音响结果就是符合自然泛音原则的自然律制。笔者非常同意陈关于古代先民制作骨笛乐律思维方面的意见。但陈在骨笛制作尺寸方面的近似，由于没有足够的骨笛测量数据加以支持，仅为大胆的假设。

三、贾湖骨笛称谓方面

黄翔鹏在《舞阳贾湖骨笛的测音研究》中首次给骨笛定名后，骨笛的称谓一直沿用至今，为大多数研究者采用。刘正国曾在《笛乎 筹乎 龠乎——为贾湖遗址出土的骨质斜吹乐管考名》一文中对骨笛称谓提出过异议，认为骨笛非笛、非筹，而应为“骨龠”。笔者认为虽然龠较笛要古老，但就最早关于龠的文献记载，骨笛和龠相隔近数千年，并没有确凿证据表明它们之间的传承关系。所以仅以形制和演奏法上的近似之处，判断二者联系，笔者认为不妥。且无论龠或笛都是以后世乐器名来命名古代出土乐器，纠缠于虚名，大可不必。

四、贾湖骨笛演奏法方面

黄翔鹏《舞阳贾湖骨笛的测音研究》、萧兴华《中国音乐文化文明九千年》、《舞阳贾湖》考古报告中对骨笛的测音演奏方法都采用竖吹法。直至《Nature》发表中对骨笛的吹奏方法描述仍为竖吹。刘正国 《笛乎 筹乎 龠乎——为贾湖遗址出土的骨质斜吹乐管考名》一文中提出骨笛的主要吹奏法应该是斜吹。夏季《中国原始音乐声学成就数理分析——贾湖骨笛研究》论文中通过对竖吹和斜吹两种方法的音频分析和比较，也认为骨笛的主要吹奏方法应该是斜吹。考查骨笛音响是研究骨笛的重要环节，只有确定了正确的吹奏方法才能准确地测音。所以笔者认为骨笛的演奏方法是非常值得研究的问题。

五、文献分类

表 1-1 文献分类统计表

分类	文献
音阶方面	黄翔鹏 《舞阳贾湖骨笛的测音研究》
	吴钊 《贾湖龟铃骨笛与中国音乐文明之源》
	童忠良 《舞阳贾湖骨笛的音孔设计与宫调特点》
	戴念祖 《中国、希腊和巴比伦：古代东西方的乐律传播问题》
	陈其翔 《舞阳贾湖骨笛研究》
	萧兴华 《中国音乐文化文明九千年——试论河南舞阳贾湖骨笛的发掘及其意义》
	萧兴华、张居中、王昌燧《七千年前的骨管定音器-河南省汝州市中山寨十孔骨笛测音研究》
	郑祖襄 《关于贾湖骨笛测音数据及相关论证问题的讨论》
	《舞阳贾湖》河南省文物考古研究所编著
	郑祖襄《舞阳贾湖骨笛调高音阶再析》
	李寄萍《骨笛仿古实验及分析推测》
	陈其射《河南舞阳贾湖骨笛音律分析》
	徐荣坤《析舞阳骨笛的调高和音阶》
	Ooldest Playable Musical Instrument Found At JIAHU Early Neolithic Site In China
律制方面	吴钊 《贾湖龟铃骨笛与中国音乐文明之源》
	戴念祖 《中国、希腊和巴比伦：古代东西方的乐律传播问题》
	陈其翔 《舞阳贾湖骨笛研究》
	萧兴华 《中国音乐文化文明九千年——试论河南舞阳贾湖骨笛的发掘及其意义》
	萧兴华、张居中、王昌燧 《七千年前的骨管定音器-河南省汝州市中山寨十孔骨笛测音研究》
	郑祖襄 《关于贾湖骨笛测音数据及相关论证问题的讨论》
	《舞阳贾湖》河南省文物考古研究所编著
	陈其射《河南舞阳贾湖骨笛音律分析》
	Ooldest Playable Musical Instrument Found At JIAHU Early Neolithic Site In China
科技考古	陈通、戴念祖 《贾湖骨笛的乐音估算》
	夏季、徐飞、王昌燧 《新石器时期中国先民音乐调音技术水平的乐律数理分析——贾湖骨笛特殊小孔的调音功能与测音结果研究》（《音乐研究》2003 年第 1 期）
	徐飞、夏季、王昌燧 《贾湖骨笛音乐声学特性的新探索——最新出土的贾湖骨笛测音研究》
	夏季 《中国原始音乐声学成就数理分析——贾湖骨笛研究》
	Waveguide Simulation Of Neolithic Chinese Flutes
乐器称谓	伊其颖 《筹与荻的辨析》
	黄翔鹏 《舞阳贾湖骨笛测音研究》
	刘正国 《笛乎 筹乎 龠乎——为贾湖遗址出土的骨质斜吹乐管考名》
	章俊 《亲历新出土的贾湖骨龠的测音》
	荣政 《舞阳骨笛吹奏方法初探——兼谈“筹”与舞阳骨的比较》
	王子初 《骨笛、骨哨》
骨笛演奏	刘正国 《笛乎 筹乎 龠乎——为贾湖遗址出土的骨质斜吹乐管考名》
	荣政 《舞阳骨笛吹奏方法初探——兼谈“筹”与舞阳骨的比较》
	《舞阳贾湖》河南省文物考古研究所编著
	夏季 《中国原始音乐声学成就数理分析——贾湖骨笛研究》
	李寄萍《骨笛仿古实验及分析推测》

第二章 贾湖骨笛音响复原研究缘起和意义

第一节 贾湖骨笛音响复原研究的意义

一、在音乐考古学上的意义

音乐考古学是近代形成的独立学科，一般作为体系音乐学的一个分支。早期是考古学的一个方面，主要对传世的或发掘出土的乐器遗物等进行研究；后来向综合着音乐学、考古学、人类学、民族学、文化史、乐器史等学科的方向发展。研究领域亦扩展到与音乐相关的古今各种实物、史料和文献，深入探讨音乐在整个社会文化、历史脉络中的地位[29]。骨笛是新石器时代的乐器，考古发掘至今尚未在随葬墓中发现任何文字、图示可以说明骨笛的相关情况。3000 多年信史中的古代文献亦没有关于此器物的任何记载。要进行音乐考古学的研究只能从乐器实物的形制、结构和音响入手，并且其中尚有很多问题需要研究者不断的探索和发现。20 多年来音乐学家、考古学家和科学家从未停止对它的研究。本研究作为音乐考古学研究领域的一部分，正是以骨笛复原逼真复原品为研究对象，还原骨笛的音乐音响属性，来探讨骨笛在新石器时代社会历史中的作用。

二、在科技考古学上的意义

科技考古学是利用现代科技分析古代遗存，取得丰富的“潜”信息，再结合考古学方法，探索人类历史的科学[30]。科技考古学和属于社会科学范畴的考古学拥有完全一致的研究对象与研究目的，但研究方法、理论和手段却与考古学大相径庭。科技考古涉及断代测年、地域考古、遥感勘查、古代工艺研究、生物考古、环境考古和农业考古等众多分支领域，研究方法和理论多来自于自然科学不同学科。（科技时报社，2006）

古代骨类器物制作工艺的研究是科技考古学重要领域。从骨笛的形制和制作

[29]中国大百科全书出版社编辑部《中国大百科全书·音乐舞蹈卷》中国大百科全书出版社 2004 年 9 月

[30]科学时报社《科技考古学：未来不再是“陪衬”》 科技时报 2006 年 1 月 6 日

工艺来看，骨制品利用和制作在旧石器时代晚期的舞阳贾湖地区，已有相当高的水平。作为古代舞阳贾湖地区重要的骨制品，拥有如此大的出土数量，在科技考古中不容忽视。贾湖骨笛部分精品制作之精美，连今人也惊叹不已。仅精湛的钻孔技术就显示出很高的手工生产水平。运用科技手段，重现骨笛的制作工艺，通过贾湖音响骨笛逼真复原，揭示古代先民在科技水平、手工生产水平、工具使用、工艺等方面情况。

所以笔者认为贾湖骨笛音响研究必将对科技考古学、考古学在古代工艺研究方面的发展有极大的促进作用。

三、在音乐史学上的意义

中国音乐史曾一度被人们称为“哑巴音乐史”，其主要原因就是中国音乐史研究中实物资料、特别是音响资料匮乏。在70年代末曾侯乙墓出土的双音编钟，至今尚可听到的音响和乐器上所刻的铭文等极为丰富的研究资料让很多研究者呼吁有必要重新认识中国音乐历史[31]。经过若干年，曾侯乙编钟研究已取得可喜的成果，使我们对距今五千多年的先秦音乐历史有了崭新的认识。舞阳贾湖骨笛出土后，刚刚开阔的视野再次被扩展到公元前7000多年，让人们惊讶地听到新石器时代远古“回响”。中国音乐史的研究不仅从此告别“哑巴”时代，而且将从此开辟出一片崭新的研究领域。

中国音乐史的研究中，研究者一直非常重视文献研究。3000年中华文明中积淀下来的丰富古代文献中，对骨类乐器的记载却非常罕见，连古代乐器分类理论中“八音”分类法也没有提及。80年代骨笛出土之所以引起学术界和理论界高度重视，古代文献中缺乏骨笛乐器的记载是主要原因之一。骨笛音响研究正是通过科学的测音手段，深入了解骨笛的音响属性，补充文献研究的不足，为重新认识中国音乐的发展历史和发展水平提供依据。

作为音乐历史的研究，复原舞阳贾湖骨笛的音响就是研究舞阳贾湖人的听觉感觉。音乐历史研究中将研究对象概括为“律、调、谱、器、曲”[32]五类对象，除了谱和器是实物资料外，其他都蕴藏于音乐音响中，看不见摸不着，只能听得

[31]黄翔鹏 《曾侯乙钟磬铭文乐学体系初探》 《音乐研究》1981年第1期

[32]项阳 《山西乐户研究》文物出版社 2001年

到。音乐是时间的艺术，“律、调、曲”在音乐音响消失之后就无法重现。我们只有通过研究“谱、器”来研究它们。在新石器时代远古时期尚无“谱”的发现，所以“器”的研究就显得特别的重要。

乐器音响是人们在音乐生活中的主动选择，音响选择自然反映出当时人们的听觉感觉，其中包括音准感觉、音色概念、对音的敏感程度等。对于舞阳贾湖骨笛而言，我们并不能确定先民是否已经具有 “律”的音高概念和“调”的音阶概念，但可以通过研究骨笛的音响了解先民的听觉感觉。

四、在乐器学上的意义

乐器学，顾名思义就是对乐器的分类和研究。中国自古就有乐器学的研究，古代人们按照制作乐器的基本材料对乐器加以分类，称为“八音分类法”[33]。八音是指八种材料：“金、石、土、革、丝、木、匏、竹”。八音分类法非常直观地对乐器加以分类。

贾湖骨笛是 “八音”之外的兽骨材料所制乐器，可见古人并没有将骨制乐器纳入到八音分类法中。其实除骨笛外，兽骨、兽角、兽壳等制作乐器在古代音乐中并不鲜见。古人为何独对此类乐器不予理睬，不将它们也纳入到“九音”分类中。到底是古人的一时疏漏，还是另有隐情，今人已不得而知。贾湖骨笛音响复原研究通过逼真的复原过程，不仅让乐器学研究者更多地了解骨制管乐器的发声、形制以及工艺情况。而且对古人的“八音”分类也是极好的补充。

乐器制造和改良是乐器学的重要研究课题。湖北省博物馆在上世纪 70 年代随县出土曾侯乙编钟后，曾开展大规模的复制工作，并总结了大量仿制经验。复制编钟不仅为编钟考古、音乐研究提供丰富的研究资料，而且为实际演奏编钟的制作奠定基础。目前不仅精美的复制编钟活跃在现代的音乐舞台上，而且丰富的乐器研究为编钟音乐的创作提供了可能。

贾湖骨笛音响的复原和编钟复制之间从乐器研究角度来说，目的一致。通过音响复原了解远古时期乐器的音律情况，并挖掘远古的乐器音响。在了解中国音乐传统传承的基础上，将它加以改良和弘扬。让它在现代文明中继续传承下去。

[33]韩宝强 《音的历程—现代音乐声学导论》 中国文联出版社 2003 年 5 月

第二节 影响骨笛研究发展的因素

一、骨笛的风蚀

骨笛研究最大的障碍莫过于骨笛风蚀。骨笛在出土前已经在地下埋葬了7000至9000多年的时间，大量有机质分解和流失使骨笛的骨质仅剩无机质，变得疏松而易碎。其中大部分由于地壳运动和堆积层压力在地下就已经破损，加上考古发掘过程中难以避免的人为损坏，所剩完整的骨笛已经寥寥无几。根据考古界的一致看法，如果器物在地下埋葬万年时间就有可能出现石化现象。事实上，部分骨笛确已出现石化现象。

为了保护骨笛不再受到进一步自然破坏和人为破坏，河南文物考古所将大部分骨笛抢救性地加以保护，其他骨笛也分送有关文博单位收藏保护。对于研究者来说也就意味着仅能在博物馆看到它，而很少有机会实地对其测音和研究。这是骨笛研究停滞不前的主要原因。

二、测音的准确性和科学性

乐器音响测量是研究乐器音响的第一步，没有准确的测量，乐器的研究也无从谈起。舞阳贾湖骨笛测音工作在骨笛发掘之初即开始，但目前得到的测音数据和结果，无论在准确性和科学严谨性上都不能达到要求。

乐器音响测量属于音乐测量中一部分。音乐的测量项目大体上可以分为两类：一种是与乐音的性质有关的、基础性的测量，如对各种乐音作音高、音色和音强等方面的测量，此外，在音乐心理学和音乐生理学的研究过程中也需要利用音乐测量手段对实验过程中的客观刺激量进行精确测量，以便于主观感觉量进行相关性研究。另一类型则属于与音乐实践有直接关系的测量，如对各种乐器（包括改良乐器和出土古代乐器）的声响特性进行测量等，对音乐厅堂的声场环境进行测量，对制作乐器的原材料进行声学品质的测量，以及对那些录制和播放音乐的电子音响产品的电声性能进行测量等。（韩宝强，2003）

骨笛按照萨克斯-霍恩波斯特尔乐器分类法，属于无吹口边棱音管乐器。边棱音管乐器是以边棱音作为激励源的乐器。即当一股气流以一定角度射向一个带

有尖锐边缘的管子入口时气流被分为两股，形成上下两个分力的气体涡漩，涡漩之间随之产生空吸，导致相互碰撞而产生振动。（韩宝强，2003）

前人对舞阳贾湖骨笛的测音工作并不能满足研究者对骨笛的研究需要，其中主要原因是由于边棱音管乐器测音的特殊性。此类管乐器测音过程中，测试人员吹奏时所采用的角度、口风和气量受测试人员心理音高感觉的影响而不自觉地改变，对所测音高有很大的影响。所以在进行声学测量的过程中，较定音、定弦乐器甚至簧鸣管乐器来说，测量数据人为因素干扰较大。再则骨笛这种无固定吹口，仅以管口处管壁作为边棱的边棱音管乐器，测试者的吹奏时自由度更高，人为误差也就更大。

另外还有测量精度受到当时仪器设备的制约，人为因素干扰不能排除。前辈的学者也注意到了这个问题，但由于时间紧迫、人员紧张以及文物保护等诸多客观原因，不可能做充足的测量研究和排除分析。

测音数据数量有限，测音研究难以达到应有的科学性和严谨性。出土骨笛完整者寥寥无几，修复工作难度较大，仅有少数可用于测音。在贾湖骨笛测音时，仅测量次数就没有统一，“有的笛取得了 16 个数据，有的只得到了一个数据”（郑祖襄，2003）。骨笛前后测音数据偏差较大，仅靠平均方法无法在数据量较少的情况下得到相对精确的结果。

三、音响属性的全面把握

乐器音响属性应包括音高、音色、音强，以往的测音仅考虑乐器音高的测量，而对音色、音强一直没有给予足够的重视，骨笛测音也不例外。贾湖骨笛发掘出土后，相关研究人员曾对它们进行部分测音工作，但由于当时技术手段的限制，仅测定音高方面的情况，忽略了对音色、音强问题。使后来的研究者无法全面了解骨笛音响属性。

另外由于当时录音技术和设备的不完善，测音过程没有留下完备的录音资料。致使后来研究者无法对当时的测音进行验证和分析。目前音乐音频测音技术手段已经有了飞跃式的发展，完全可以对骨笛的音响作全面地分析测量，但我们却失去了再次测音的可能性。

综上所述，不难看出骨笛研究材料的缺乏是骨笛研究发展的症结所在，测音

数据的缺失、认识的不全面等问题都源于研究材料的缺乏。以至于在20年中对舞阳贾湖骨笛的研究虽然时有进展，但总体而言，未达到应有的认识水平。解决骨笛研究材料的缺乏是骨笛研究进一步发展的必经之路。

第三节 骨笛仿制研究

为了解决骨笛研究材料缺乏的问题，童忠良在1992年连同武汉音乐学院蒋朗蟾、荣政、李幼平等率先仿制五支七孔骨笛（童忠良，1992），仿制过程虽没有详细的文字说明。但在以仿制的方法解决骨笛研究材料缺乏问题，走出探索的第一步。

中国艺术研究院音乐研究所王子初也曾为了教学和科研的需要，仿制过部分的骨笛。据笔者的了解，仿制骨笛大多采用骨粉（即牲畜饲料中添加的骨粉，用于补足其钙质缺乏）和胶混合后铸成。仿制骨笛是以骨笛的纵向一半为尺度做胚，分别铸成骨笛的两半，音孔部分也直接在铸造过程中完成，然后将其粘合后进行适当的打磨和修整。王子初先生曾赠予笔者M78:1的仿制品，在赠予骨笛时候，曾明示笔者，仿制品的制作是王先生笔描图纸，由他人代做，所以仿制骨笛并不能保证和原件完全一致，音列的情况就更不足以和原件相提并论。王子初先生还告诉笔者，制作这样的骨笛仅仅是为了教学时可以有相对形象的例子，而非对骨笛音响的逼真复制。笔者曾对此仿制品粗略进行了一些测音，发现正如王先生所言，音列较原件测音数据有非常大的偏差，且尺寸亦有较大出入。此仿制骨笛自然不能用于研究。

中国科技大学科技考古学系的夏季在其论文中也曾使用仿骨塑料管用于骨笛的模拟测音。此方法简单易行，塑料管易于加工，为许多研究者采用。但缺点精度不高，无法做到逼真模拟。

近年来还有一些研究者采用其他动物骨骼仿制骨笛，如泉州师范学院艺术学院南音系李寄萍采用当地火鸡的长腿骨进行仿制（李寄萍，2005）。该做法对笔者启发很大，同时笔者认为该做法欲达到一定精度尚有一定困难。首先，材质上的差异过大。笔者虽未见论及不同部位骨骼骨质的差异有关文献，仅笔者对鹤类尺骨和胫骨的观察，发现两个部位的骨质因其功能的不同差异明显。另外即使是同类飞禽，相同部位尺寸也有差异。仅鹤类而言，体型大的赤颈鹤和体型小的蓑

羽鹤骨骼长度、骨径均差异明显，不同种类的地禽差异可能更大。如果大体尺寸和材质尚未保证，则仿制品音响难以保证。

第四节 贾湖骨笛音响复原研究

一、空气动力学有限元方法

在课题开始之初，根据笔者拟以空气动力学的有限元仿真分析方法，将骨笛内空气柱在计算机上分割为若干个有效质点，以此建立流体力学模型。再给予某种模式的吹奏激励，采用计算机数值分析方法，得出振动模型的振动模态，从而绘出不同孔位的频谱，来达到音响复原的目的。

笔者在有限元分析 ANSYS8.0 软件上初始建模[34]。开始着手尝试后即发现问题并不像笔者想象的那么简单。其中涉及理论模型建立和参量选择的众多问题。

首先 ANSYS 无法提供管乐器发声的理论振动模型。管乐器发声原理是激励体和管乐器空气柱的相互耦合作用，即吹口气旋振动体相对于空气柱作用和空气柱起振后对于吹口气旋振动体的反作用之间的耦合。ANSYS 并不能提供耦合作用的理论模型。以往的空气动力学模拟都是假设单一激励源建立流体振动模型，然后将多个激励源所产生的流体振动模型进行叠加。单从边棱音管乐器激励源本身也是空气撞击振动的复杂模式，就没有现成理论模型可以采用。且耦合作用的理论机制尚不完善，无法自定义理论模型加以分析。

另外 ANSYS 软件的分析需要大量物理学、力学、材料学参量数据，例如管材料的密度、表面粗糙度等物理属性数据和管材料的弹性、空隙率等[35]。这些参量的获得需要对骨笛材质做大量力学、材料学实验。

笔者以此咨询清华大学机械工程系从事有限元分析的专家史清宇和赵海燕教授，他们认为就笔者拥有的研究时间、研究能力、人力和经费来说，采用有限元分析仿真分析方法难度过大。

[34]ANSYS10.0 有限元分析软件 www.ansys.com

[35]George K.Batchelor《AN Introduction to Fluid Dynamics》 Cambridge University Press 2004.4.1

二、材料学仿真方法

笔者在最初想法受挫后，转向从材料仿真的角度加以考虑。拟根据文献提供的尺寸数据，采用振动特性接近骨笛的仿制材料，对骨笛实物进行逼真复制，然后通过音响测量研究和分析。

在询问清华大学材料科学系王雪梅博士后得知，仿制材料要在振动特性上和骨笛材质达到一致性，至少必须保证材料质量、密度、弹性模量、空隙率这四个参量的一致性。而且仿制骨笛在形状尺寸上有要求的情况下，仿制材质需要具有相当的常温可塑性。自然界中除原动物骨骼以外，应该没有相应的材料，只能借助合成材料。

骨骼中除了钙、磷等无机物质，其他大部分成分为骨胶原[36]。胶原是一种混合蛋白质，其中的蛋白质成分众多，且成分配比各不相同。不同骨骼无机物和胶原有机质的配比也并不一样。王雪梅博士认为如果要合成此类骨材料，必须对原骨材质做骨组织工程学定量成分分析，否则无法保证其空隙率和弹性模量。而目前在骨组织工程学领域，合成骨多用于人骨的修复，一般不需控制其成分量的多少或关注其振动特性，而仅注重合成骨材料和人骨是否发生排逆反应。

王雪梅博士还提醒笔者，做这样的合成骨材料价格非常昂贵，一般以毫克计量为每毫克一万到三万元人民币不等，如果为骨笛这一乐器合成骨材料，不得不考虑其成本核算问题。

鉴于研究经费和该方面研究的复杂性，笔者难以能够负担，只好作罢。

三、鹤骨仿制方法

前两种方案都遭遇阻碍后，笔者决定采用鹤骨对贾湖骨笛进行逼真复原。《舞阳贾湖》考古报告中已经把贾湖骨笛的制作材料定性为丹顶鹤尺骨，这为笔者确定贾湖骨笛逼真复原材料的选择指明方向。

丹顶鹤为我国一级保护鸟类，要取得其骨骼并非易事。笔者曾考虑使用鸵鸟或其他大型禽类骨骼代替，但由于其他大型禽类体型、生活习性、骨骼强度等方面与丹顶鹤有较大差异，无法达到逼真复原的材料要求。

[36]裴国献《骨组织工程学研究现状及发展趋势》 中国创伤骨科杂志 1999年9月第一卷第一期

经由中科院动物研究所徐延恭研究员的引介，笔者和辽宁省沈阳市沈阳野生动物园鹤类繁殖中心基地的张玲同志取得联系。2005 年 4 月 9 日，从张玲处获悉，鹤类繁殖中心基地一雌性丹顶鹤发情期和其他丹顶鹤争斗，被喙伤后不治而亡。笔者立刻赶到沈阳，在沈阳野生动物园园区领导的支持和帮助下，顺利取得该鹤的一对尺骨、桡骨、肱骨和另一只鹤的胫骨。

首先，利用取得的尺骨，按照《舞阳贾湖》考古报告中所公布的尺寸，用精确的加工设备进行精密加工，还原舞阳贾湖骨笛的本来面目。

然后，利用精确的计算机测音和频谱分析软件，设计合理的乐器测量程序，对精密加工出的骨笛复原品的音高、音色、音强进行详细的测量。以往测音针对经过地下 7000 年到 9000 年埋藏骨笛，由于骨笛材质变化所带来的音响变化难以避免。而现在按照原样复原出的骨笛，材质和新石器时代制作的骨笛材质完全一致，必能还原出新石器时代先民所制骨笛的真实音响数据。

在真实音响数据的基础上，结合前人的研究以及测音数据，辨析前人测音的误差和产生原因，并进一步探讨骨笛的音律问题。

另外笔者在赴沈阳和张玲谈到骨笛的时候，张玲女士给我提出了值得注意的问题。即张玲女士在看过笔者提供的骨笛图像资料后认为，仅从 M78:1 的形状上看，胫骨极有可能亦是制作骨笛的材料。且制作骨笛的材料还可能是其他鹤类的尺骨，如白鹤或赤颈鹤等大型鹤类。笔者觉得有进一步探讨骨笛制作材质的必要。如果制作骨笛可以使用其他飞禽骨骼的话，骨笛制作的材料来源就会大大地拓宽。

针对小七孔的成因问题，中国科技大学科技考古学系的夏季在其论文中论证应为调音所制（夏季，2003）。笔者通过对鹤类尺骨、胫骨仔细观察发现，鹤类尺骨、胫骨上都有与骨端连接的纵脊贯穿小孔。将纵脊剔除，在尺骨和胫骨上就会留下不到一毫米的天然穿孔。对照骨笛的图像资料，天然小孔在大部分骨笛上都清晰可见，而在 M282:20 骨笛上，却似乎正好被七孔孔位覆盖。笔者不否认七孔调音作用的存在，但笔者认为进一步探讨一下小孔调音功能的发现和天然穿孔的关系很有意义。

总而言之，笔者将研究题目定名为《舞阳贾湖骨笛的音响复原研究》，意在复原先民远古制作的骨笛，并通过规范的测音来揭示骨笛音响。这样做不仅补足

舞阳贾湖骨笛研究材料的缺乏，补充部分骨笛测音数据的缺失。而且可以通过复原骨笛实物的制作和测音实验，发现骨笛相关问题，并加以分析和研究。只是目前鹤骨骨骼仅可以制作两支骨笛，无法达到全面复原骨笛的要求，但笔者认为作为鹤骨制笛的探索，两支骨笛的制作已经在复原方法和研究手段上夯实了骨笛深入研究的基础，具有足够推广价值。

第三章 鹤骨制笛相关问题探讨

河南文物考古研究所编著《舞阳贾湖》考古报告 1999 年正式出版，其中上卷第六章《遗物》中介绍了舞阳贾湖骨笛的情况。在舞阳贾湖骨笛制作原材料和制作工艺部分，指出“经鉴定，骨笛的原材料均系丹顶鹤的尺骨所制。在遗址中还见有丹顶鹤的肱骨、尺骨、腕掌骨、股骨、胫跗骨等”。该论述明确提出骨笛的制作材料为丹顶鹤尺骨，以往研究者发表文章中均未明确提出这一点，而多采用“猛禽的翅骨”或“鹤类翅骨”等加以描述。文中虽没有介绍鉴定过程，但作为正式考古研究报告，应予以肯定。

第一节 丹顶鹤相关情况

丹顶鹤在动物分类系统中属于鸟纲、鹤形目、鹤科、鹤属。在现存 15 种鹤中，丹顶鹤与美洲鹤的亲缘关系最近。从形态上，和赤颈鹤、澳洲鹤、白头鹤、美洲鹤和灰鹤都很接近。丹顶鹤为著名候鸟，从现在繁殖区域来看，主要分布在东北亚的黑龙江流域和日本的北海道，迁徙最南可到我国的海南省境内。自古就有“南游湘水、东入辽城”的诗句，可见古人很早就已经知道丹顶鹤的迁徙规律。今舞阳县贾湖村所处河南省的地方志对丹顶鹤分布曾有所记载，如明嘉靖二十五年（公元 1546 年）裕州志（今方城县）、清顺治十六年（公元 1659 年）仪封县志等。依据近年来的多次调查，丹顶鹤主要分布在中国、蒙古、俄罗斯、朝鲜、韩国和日本等地。目前丹顶鹤在我国最大的繁殖区在黑龙江三江平原和松嫩平原，在区域内分别建立了扎龙、七星河、莫莫格等多个自然保护区。丹顶鹤在我国最大越冬区就是江苏盐城的沿海滩涂。[37]

丹顶鹤的成长过程要经历幼鸟、亚成体、成体三个阶段。丹顶鹤 3 年即为成鸟。丹顶鹤的成体雄鸟略大于雌鸟，翅膀阔而强，一般长 64~68cm。（马逸清，2002）

[37]马逸清、李晓民 《丹顶鹤研究》上海科技教育出版社 2002 年 6 月

性别	体重(kg)	体长	嘴峰	翅长	尾长	跗跖
雄性	11.74	150.2	16.5	68.8	27	30.8
(3)	8.6~12.08	144~156.8	15.2~17.4	67~82	26~28	30~31
雌性	9.6	138	16.1	68.8	26	28.8
(3)	6.2~11.84	110~140.6	15~17	64~81	25.4~27.8	28~30.9

表 3-1 丹顶鹤身体度量 单位:厘米（马逸清，2002）

丹顶鹤的骨骼系统与其他鸟类一样，主要由中轴骨和四肢骨两部分构成。中轴骨包括头骨和连接胸骨、肋骨的脊柱。四肢骨包括肩带与前肢和腰带与后肢骨。其中前肢骨由肱骨、尺骨、桡骨、腕骨、掌骨、指骨构成，后肢骨由股骨、腓骨、胫骨、跗跖骨和趾骨。

肱骨是丹顶鹤最粗的长骨，呈“∫”型，稍侧扁。近侧端膨大，与肩臼相接，此端下后方有一近圆形大孔，孔的内壁上还有若干小孔，使骨腔与锁间气囊相通。远侧端有两个突出关节面和下方的一个肌肉附着的突起。从肱骨端面可见骨管内壁（尤其长骨的两端）有许多细小的骨架从不同方向互相连接，肱骨端面骨管壁厚 1.1~1.3mm。

前臂包括两块长骨。尺骨粗，呈弧形弯曲（凸向后方），后缘有排成一列的 16 个小结节，是次级飞羽附着点，其中第 13、16 两个结节低平而不显。尺骨断面测量，骨管壁厚 1.0~1.5mm。骨管内壁有骨梁相互连接。桡骨细，位于尺骨前侧，亦呈弧状弯曲，其中部凸向翼的上方，桡骨近侧端有端面近阶梯形的凹关节面。（马逸清，2002）

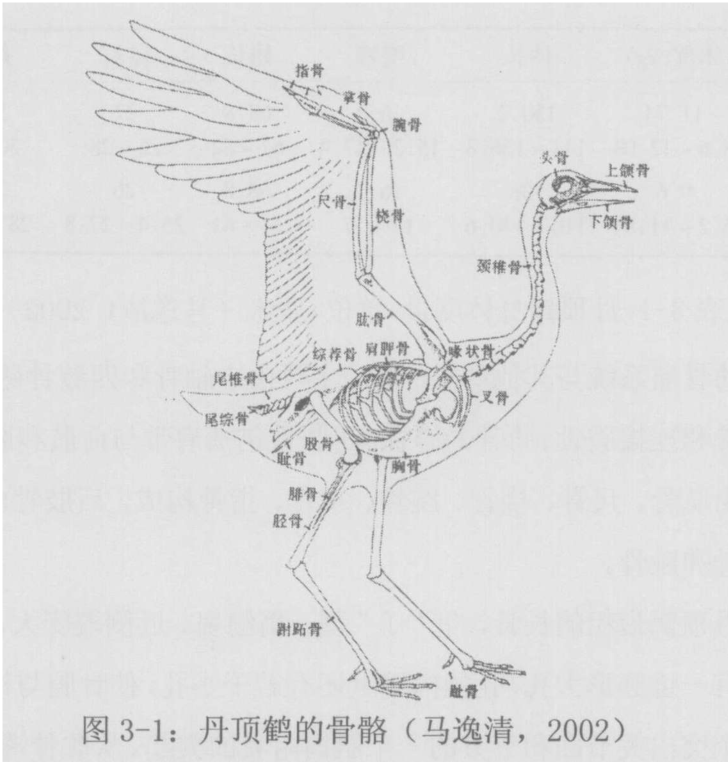


图 3-1：丹顶鹤的骨骼（马逸清，2002）

标本数	肩胛骨	乌喙骨	锁骨	肱骨	尺骨	桡骨	Ⅲ掌骨	Ⅱ指	Ⅲ指	Ⅳ指
7只 平均	141.2 130～ 150	98.3 92～ 102	118.1 112～ 128	266.8 255～ 273	395	381	128	30	96	22

表 3-2 丹顶鹤肩带和前肢骨的测量　单位：毫米（马逸清，2002）

股骨较粗短，稍弯曲。胫骨或称胫腓骨，是全身最长的长骨，形通直，近侧端为不规则的膨大部（胫骨粗隆），与股骨连接。

跗跖骨是一枚单独的管状长骨，约与尺骨等长，形笔直。近侧端有 2 个关节窝和胫跗骨关节，后侧有一个被圆孔上下贯通的短的纵脊。（马逸清，2002）

标本数	髂、坐骨长	耻骨长	髂骨最大宽	股骨长	胫跗骨长	跗跖骨长	趾骨长			
							后趾	内趾	中趾	外趾
5只 平均	191.6 185～ 205	118.6 114～ 122	88.9 85～ 94.8	151.7 142～ 163	340	289	40.1	99.4	24.2	0.2

表 3-3 丹顶鹤腰带和后肢骨的测量　单位：毫米（马逸清，2002）

第二节 丹顶鹤骨骼样本的物理尺寸测量

笔者取得丹顶鹤骨骼后，对丹顶鹤进行适当处理。将尺骨和桡骨以及肱骨肌

腱连接割除，用手术刀将丹顶鹤骨骼残留肌肉剔除。所得骨骼如下图所示：

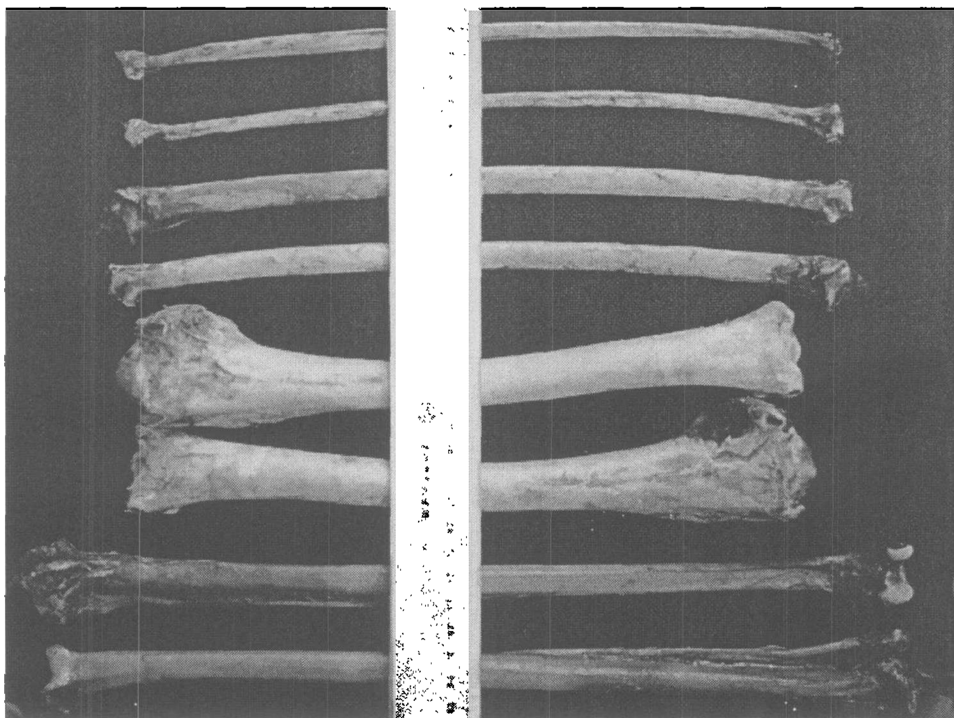


图 3-2 丹顶鹤骨骼（1）

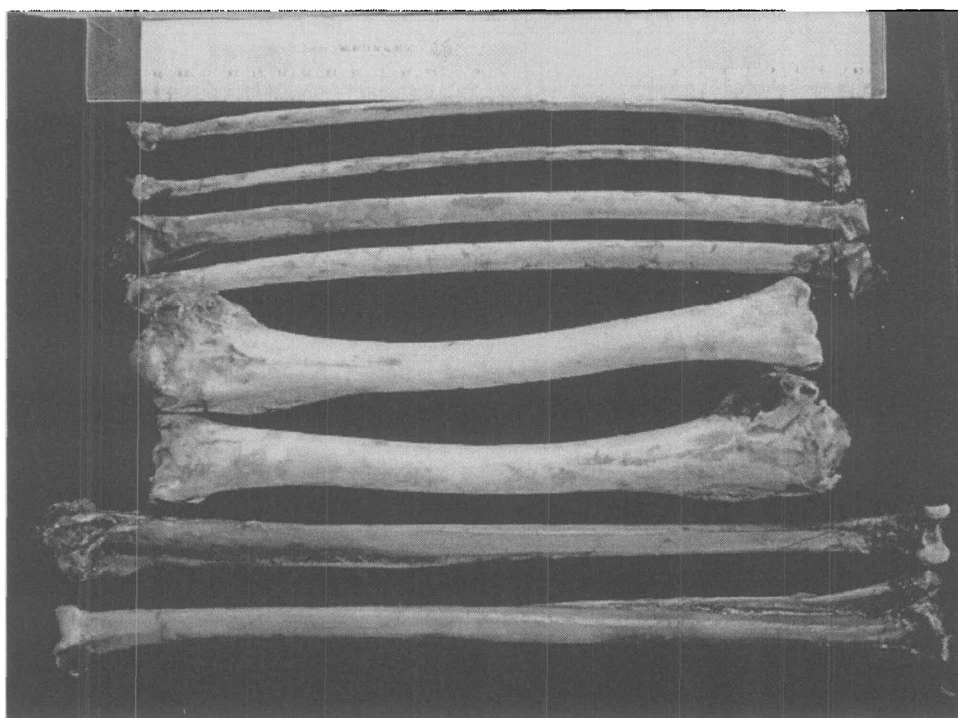


图 3-3 丹顶鹤骨骼（2）

骨骼	第一次测量(cm)	第二次测量(cm)	第三次测量(cm)	平均
尺骨（左）弯曲长侧	29.41	29.45	29.49	29.45
尺骨（左）弯曲短侧	29.14	29.18	29.22	29.18
尺骨（右）弯曲长侧	30.25	30.4	30.3	30.32
尺骨（右）弯曲短侧	29.5	29.65	29.55	29.57
桡骨（左）弯曲长侧	28.6	28.78	28.72	28.7
桡骨（左）弯曲短侧	28.53	28.61	28.59	28.58
桡骨（右）弯曲长侧	28.75	28.8	28.92	28.82
桡骨（右）弯曲短侧	28.63	28.71	28.65	28.66
肱骨（左）	27.49	27.3	27.5	27.43
肱骨（右）	27.4	27.38	27.3	27.36
胫骨（左）	33.42	33.46	33.51	33.46
胫骨（右）	33.39	33.48	33.55	33.47

表 3-4 骨骼长度测量表 单位：厘米（测量者：孙毅）

由于骨管径成不规则变化，无法进行精密测量，所以这里只给出其直径范围。尺骨直径 1.0~2.2cm，桡骨直径 0.4-0.7cm，肱骨直径 2.7~5.2cm，胫骨直径 0.9~2.6cm。

尺骨、胫骨和桡骨上均发现纵脊贯穿的小孔，孔斜线穿入骨壁，孔径一般不超过 1 毫米。桡骨亦此小孔，但尺寸非常小，不易看见。锯割骨骼两端关节后，清理骨管内骨髓，挑出堵塞小孔的肌腱，则小孔成通孔。

第三节 丹顶鹤骨骼尺寸和骨笛尺寸

由前面对丹顶鹤骨骼的介绍和实测丹顶鹤骨骼的情况看，丹顶鹤的尺骨和胫骨骨长平均在 39.5cm 和 34cm 左右，骨径范围也基本和舞阳骨笛尺寸范围相符，即在骨长、骨径和形制上均符合制作骨笛的要求。而肱骨和桡骨，在骨长方面虽然符合骨笛的长度，但骨径差距较大，不可能用于制作骨笛。

根据笔者对丹顶鹤骨骼的测量，尺骨关节长度细端一般为 1.5cm，粗端为

4.5cm。其中即有问题凸现出来。

根据《舞阳贾湖》考古报告公布的骨笛长度测量数据基本都在20厘米左右，特别是出土半成品H87:2的长度为21.2cm，且明显保留有骨关节的。《舞阳贾湖》所描述保存完成的4支骨笛的规格，笔者分析描述如下：

样本	总长	是否留有关节	至多截取长度	预计原骨长
M282:21	23.6	两端保留	6	29.4
M282:20	22.7	两端稍显	6	28.7
M78:1	20.45	两端保留	6	26.45
H87:2	21.2	一端保留	6	27.2

表3-5 骨笛规格和预测原骨长 单位：厘米

从上表中不难看出，所有保留完整的大部分骨笛总长度都达不到正常成年丹顶鹤的骨骼平均长度。这有两种解释，一、舞阳贾湖的先民多使用未成年丹顶鹤的尺骨进行骨笛的制作。但随之而来的问题是，骨径亦应该较正常成年丹顶鹤的平均骨径小。但仅从目前公布的骨笛M282:20和M282:21骨笛以及H87:2半成品的骨径来看，基本属于成年丹顶鹤的尺骨骨径范围内。二、先民可能也使用其它鹤类尺骨制作骨笛，比如体型稍小的白枕鹤等。

第四节 胫骨制作骨笛的可能性

张玲女士是长期从事丹顶鹤饲养和研究的专家，在初见骨笛M78:1图片时，提出胫骨制作骨笛的可能性。

笔者认为就此问题有进一步探讨的必要。因为如果采用胫骨可行的话，即意味着对骨笛认识又上升一步。另外笔者复原骨笛的材料就可以增加两支胫骨，可复原的数量也有所提高。对于今后骨笛复原也有很大的促进，复原骨笛材料选择范围有所拓宽。

一、胫骨和尺骨的异同

丹顶鹤尺骨和胫骨在骨骼功能上的区别，导致其骨材质亦有差异。尺骨需承受空气的压力和侧向应力，骨质硬而轻，富有韧性。而胫骨只承受纵向应力，骨质硬而脆，质量较重。骨质差异较大两种骨骼制作出来骨笛音响必然有较大的差异，势必影响骨笛的复原，所以两种材料在制作骨笛方面不可以混用。

笔者通过对尺骨和胫骨外观比较，尺骨和胫骨在形态上也有明显的区别：其一，胫骨较尺骨平直，弯曲度较尺骨小。其二胫骨在上骨端骨管成扁平状，而到下骨端则骨内径趋于变小。尺骨则不然，上骨端骨外型虽然成扁平状，但骨管内径则成不规则圆形，直至下骨端一直保持较为均匀的管径，变化较胫骨小。其三，胫骨侧边由于通过腓骨连接股骨，在剔除腓骨后会留下 4~5 厘米的腓骨连接部，较为突出。而尺骨除凸出面有 16 个次级飞羽附着点外表面光滑。（马逸清，2002）

当然胫骨和尺骨也存在较多的共同点。首先无论胫骨还是尺骨，在去除骨髓后都有较为完美的骨管，而其他骨管如跗跖骨内遍布纵脊和连接骨。另外尺骨和胫骨都有纵脊贯穿骨壁的小孔。再者胫骨和尺骨在骨端的关节形态上亦有相似之处。

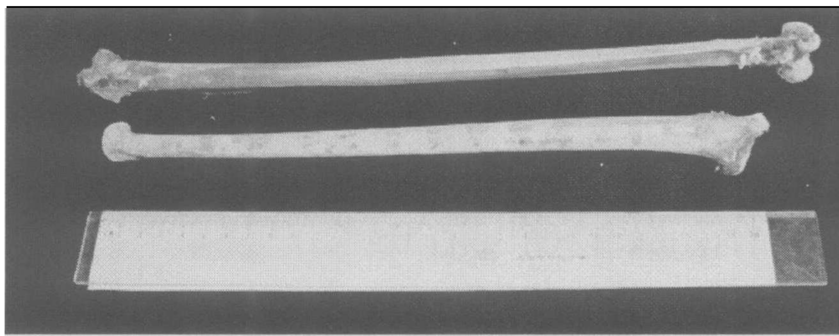


图 3-4 胫骨（上）和尺骨（下）

二、胫骨制笛

综合以上两种骨骼在材质和形态上异同，仅以《舞阳贾湖》所载彩色图版三九，5 和《OLDEST PLAYABLE MUSICAL INSTRUMENT FOUND AT JIAHU EARLY NEOLITHIC SITE IN CHINA》公布骨笛的高清晰照片来看，M78:1 通体笔直，在尾部破损处有轻微膨胀的迹象。尺骨并不具有如此笔直的骨管，这是张玲女士推断胫骨制作骨笛可能性的理由之一。

另外在整个 M78:1 上，没有看到斜向贯穿骨壁的小孔。而笔者现有两支胫骨上此小孔均处于腓骨连接部的位置附近。此小孔完全有可能在切割 5cm 的腓骨连接部时被一同割去。

还有就 M78:1 号骨笛长度而言，假设为胫骨所制，笔者现拥有的胫骨骨骼上不平整的腓骨连接部分约为 5cm 左右。加上笛体全长 20.45，也不过 25cm 左右，离全长约 33cm 尚远，完全符合骨笛制作的长度要求。

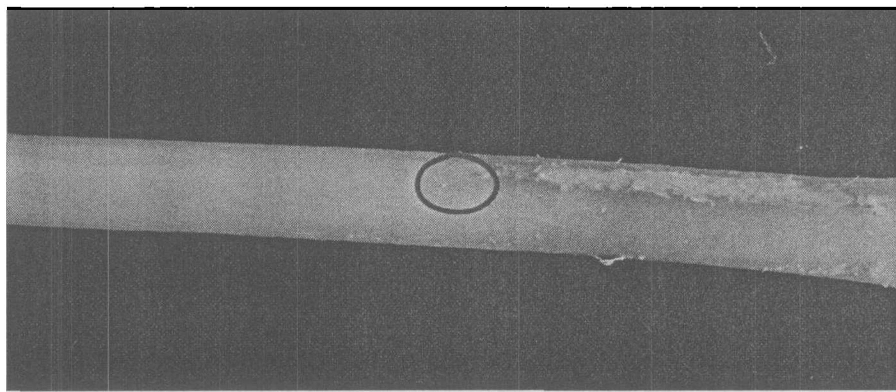


图 3-5 胫骨上天然小孔

由以上论述，不难发现无论从骨笛纹理和长度等特征上，胫骨都具有制作骨笛的可能。唯一不能确定的就是其弯曲度情况。由于笔者和张玲女士都没有见过骨笛的实物，仅从照片的观察难免会产生偏差。所以就此问题上笔者暂不定论，留待今后的实物鉴定。

第五节 M282:20 笛上小七孔的讨论

M282:20 特殊的小七孔，在骨笛研究中最富争议的问题。其中主要的两个观点：其一先开小七孔，开之过高，调整后开大七孔；其二先开大七孔，失之过低，开小七孔调音。长期从事舞阳贾湖骨笛的萧兴华同意前一种看法，而黄翔鹏等学者倾向于后者。2003 年夏季发表论文《中国原始音乐声学成就数理分析——贾湖骨笛研究》中对小七孔的比较分析，最后结论也倾向于特殊小孔的调音功能。

仔细观察丹顶鹤骨骼后，笔者在丹顶鹤尺骨和胫骨上，分别发现天然形成的小孔。该小孔多位于尺骨距较粗一端 1/3 骨长的位置，孔径约为 1mm 左右。在胫骨上则位于腓骨膨胀处的旁边，孔径亦为 1mm 左右。

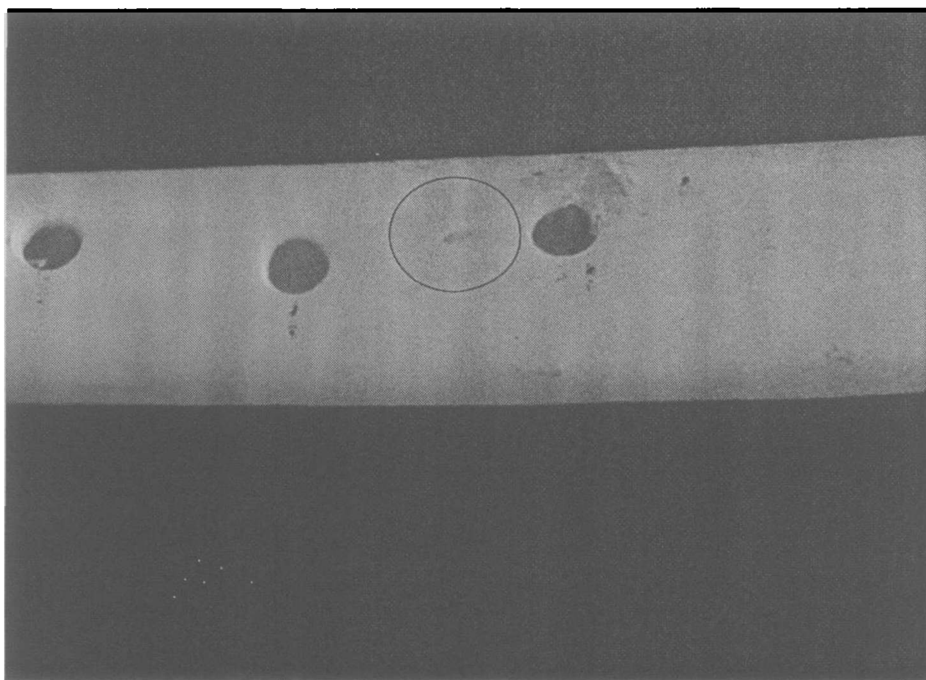


图 3-6 尺骨上天然小孔

仔细观察《OLDEST PLAYABLE MUSICAL INSTRUMENT FOUND AT JIAHU EARLY NEOLITHIC SITE IN CHINA》上发表的图片，不难发现图中六支骨笛除 M78:1 骨笛和 M282:20 骨笛没有天然小孔外，其他都明显可见。

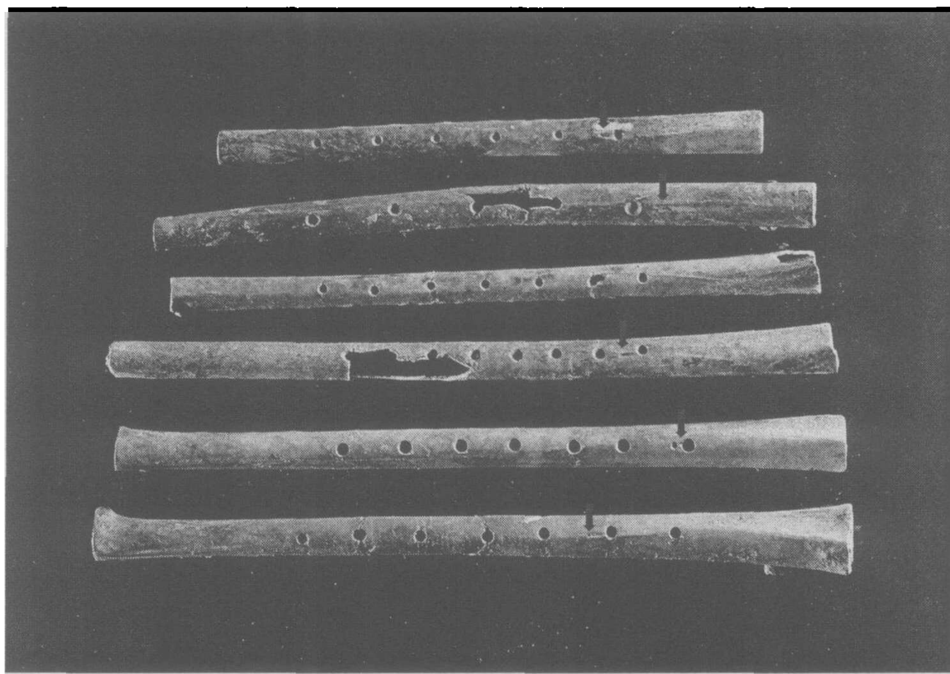


图 3-7 骨笛上天然小孔

在有天然小孔的四支骨笛中，M341:1 和 M341:2 为早期的两支骨笛，M282:21 为中期骨笛，M253:4 号骨笛为晚期八孔骨笛。早期六孔骨笛 M341:2 上天然小孔

处于吹孔起第 6 孔前的位置，晚期 M253:4 的天然小孔处于吹口起第 8 孔前的位置。M341:1 为早期五孔骨笛，天然小孔处于吹口起第 5 孔后的位置。笔者认为仅从目前可以见到的这六支骨笛来看，似乎有这样的一个规律：即天然小孔总是处于骨笛最后一孔的附近，并辅于最后一孔前的位置。

五孔骨笛虽然不完全符合，但假设将五孔骨笛看成六孔骨笛前五孔的话，则天然小孔也正好处于六孔孔位前的位置。

《舞阳贾湖》一书中所载“M282:21 号骨笛为墓主人生前已经折断，这支骨笛若不是墓主人祖先所传，也是墓主人在世时的骨笛精品，虽然折断而未弃，经过精心修理，在两处折断处的骨笛壁上钻了 14 个小孔，用细线进行辍合继续使用”。正是在这支精品骨笛上天然小孔的位置并不符合前面提到的规律，天然小孔处于 5 孔和 6 孔之间。但值得注意的是，M282:21 骨笛的天然小孔仍居于六孔前的位置，这种位置关系和前面提到的天然小孔依傍最后一孔出现的规律又存在一定的相似关系。

如果天然小孔出现规律成立的话，则 M282:20 号骨笛的小七孔调音功能就有模仿天然小孔位置的可能。仔细观察骨笛图片可以看出，在 M282:20 号骨笛的七孔前沿有一个凹陷部分，它很容易使人想起天然小孔的前沿形状。也就是说天然小孔的位置被七孔所占。先民开七孔后，发现音响并不理想，于是模仿天然小孔在其他骨笛上的位置，开小七孔进行调音。

综上所述，笔者认为古代先民并没有无视天然小孔的存在，而是将其纳入到骨笛制作的考虑之中。M282:20 小七孔调音的功能正是模仿天然小孔位置而出现。当然以上只是基于目前所掌握材料进行的大胆猜测，由于笔者所可参考的资料有限，需要等待更多研究材料的补充和验证。

第四章 材质、管径、管长对骨笛发声的影响

第一节 研究目的

管乐器是所有以空气作为振动体乐器的总称，在萨克斯-霍恩博斯特尔分类法中称为“气鸣乐器”。管乐器根据其发音激励源的不同分为边棱音乐器、簧鸣乐器、唇鸣乐器三大主要的分类，边棱音乐器是当一股气流以一定角度射向一个带有尖锐边缘的管子入口时气流被分为两股，形成上下两个分力的气体涡漩，涡漩之间随之产生空吸，导致相互碰撞而产生振动（韩宝强，2003）。振动和管子中的空气柱产生耦合而产生音响。边棱音管乐器种类很多，如笛类乐器大多属于边棱音管乐器，还有箫、埙、骨笛、骨哨等。

舞阳贾湖骨笛属无吹口边棱音管乐器，对它音响复原，笔者确定用丹顶鹤尺骨来进行。其中不可回避的问题，即丹顶鹤尺骨随鹤的年龄、鹤健康状况等，骨质、骨长、骨径都会有细微的差距。前面章节也提到并不能排除骨笛采用其他骨骼或采用其他飞禽尺骨制作的可能性。

考虑个体差异问题，为了保证数据有效性，笔者需要用确定此类边棱音管乐器管长、管径、管体材质对其各音响属性的影响。

笔者翻阅大量物理声学、材料学和音乐声学的书籍和文献[38][39]，希望从中得到答案。但除管乐器管长和频率之间计算公式[40]外，管径和材质的影响没有定量分析的方法。而且没有关于管乐器长度、管径、材质三者变化和乐器各项音响属性变化之间关系的研究。

在本章中，笔者对以往就边棱音管乐器对管长、管径、材质敏感性的研究加以总结。并结合骨笛具体情况，通过适当实验分析，来指导骨笛的复原。

第二节 边棱音管乐器音响研究

边棱音管乐器音响属性主要包括：音高、音强和音色。以下从管长、管径、管材料对三个音响属性的影响做简要概述。

[38]马如璋等编著《功能材料学概论》冶金工业出版社 1999 年 9 月
[39]Donald E.Hall《Musical Acoustics》 2nd ed. Brooks/Cole Publishing Company 1990
[40]Thomas D.Rossing《The SCIENCE OF SOUND》 2nd ed. Addison-Wesley Publishing Company March 1990

一、音高

音高可以是主观听觉概念也可以是客观听觉概念，与之对应物理声学客观量为振动频率。边棱音管乐器从音乐声学原理来说，激励体的空气、振动体的空气柱、共鸣体的管腔和管材料、控制机构的音孔都可以影响边棱音管乐器的音高。

边棱音管乐器的音高并不取决于边棱音的频率，而取决于管内的空气柱振动频率。当激励声源——边棱音的振动激发起空气柱振动时，二者在振动频率上发生相互调制，这个调制过程称为耦合。在耦合过程中，空气柱的振动频率起主导作用，最终决定边棱音管乐器的音高。按开管、闭管的不同，音高和管长的关系表示如下

$f = \frac{v}{2L}$（开管）

$f = \frac{v}{4L}$（闭管）（韩宝强，2003）

即边棱音管乐器音高（频率）和声速成正比，与管中空气柱长成反比。声速在温度恒定的同样介质当中，保持不变。所以管中空气柱长是影响音高的最重要因素。

音乐声学中“管口校正”（End Correction），也就是根据空气柱“溢出”的那部分来校正管长度，也是影响管乐器音高的因素之一。其中管口校正的数值因演奏方法、管长、管径、管内壁光滑度和管材料的不同而不同。所以边棱音管乐器的管口校正大多采用“经验公式”或“实验公式”加以描述，即在一定条件内有效的经验公式。

管材料对于边棱音管乐器音高的影响一直没有令人信服的结论。目前普遍认为管材料仅会对管内空气柱中平流和湍流分布情况有影响（马如璋，1999），对音高的影响非常微小。另一种看法认为，由于管材料表面张力不同，带来管乐器管口“溢出”量不同，即管口校正量不同，从而间接影响音高。

二、音色

管乐器音高尚有频率物理量与之对应，并有公式可以参照。管乐器音色却在理论上没有明确的客观量可以对应。音色本身是一个主观的概念，主要依赖主观

评价。亥姆霍兹[41]1877年提出的“谐音列”理论和后来科学家提出的“起始状态”理论逐渐为理论界广泛接受，目前把这两种理论作为影响音色的客观因素。一些学者认为噪音也是影响音色的重要方面，如判断小提琴的音色时会很大程度上受到琴弓和弦之间短暂的擦弦噪声的影响。管乐器也是一样，气息进入管体的声音、口风的气声等都是人们对一种管乐器形成音色概念的重要因素。典型例子有簧管乐器和边棱音管乐器的气声是从音色上判别两种管乐器的根据。

管乐器音色从音乐声学角度来说和激励体气流、振动体空气柱、共鸣体管腔和管体都有关系（韩宝强，2003）。实际操作的乐器设计师和乐器制作者们并不一定了解声学原理，他们习惯于根据他们的听觉来判断，用听觉经验指导管乐器选材和制作。管腔大小、管材质影响管乐器音色的描述多为经验性、主观判断。如某某地方某某时间的某某材质对于制作管乐器最好；某尺寸腔体可以达到最佳的共鸣等。这些判断代表个人主观的看法，虽然有些得到公认，但无法形成一致、统一的标准。直到现在为止，还没有方法可以定量分析出管体的管径、管长、管材质和管乐器音色之间的关系。

三、音强

音强也是客观听觉概念，与之相对应的物理声学主观量是响度。音强和声波能量高低相联系，采用声压级加以描述，并可用设备测得。

管乐器音强在声学原理上和气流、空气柱、管腔和管体材质都有关系。而且普遍认为管乐器音强和音色具有一定的关联性。具有好音色的乐器其材质和结构是可以让振动能量在极短时间内聚集释放③，从而产生较大的音强。管乐器容易达到较好的动态范围。当然关联不具有必然性，具有很大音强的乐器，音色可能很糟糕。

第三节 骨骼材质、尺寸对音响复原的影响

前面章节中已经提过，丹顶鹤骨密度、骨骼尺寸和活体年龄、健康状况、饮食结构等综合因素有关。如果确定使用丹顶鹤骨骼进行复原研究，必须面对骨长、

[41]Helmholtz 《On the Sensation of tone as a Physiological Basis for the Theory of Music》 4th.ed Tran. By A.J.Ellis，1954

骨径、骨材质方面的差异。长度的差异用切割方法容易解决，但在确定长度的情况下，直径和骨质上的差异难以保证。而且丹顶鹤骨管是非同径、粗细不均的异形管，每只丹顶鹤的骨管就如同人的指纹不可能完全一样。

所以在复原骨笛之前，需要至少清楚以下三个问题：

1)骨径的变化是否会对骨笛的音高、音色、音强产生影响

2)骨材质的不同是否会对骨笛的音高、音色、音强产生影响

3)骨径和骨材质对骨笛音响属性的影响程度如何，在一定范围内可否忽略不计

一、骨径对音响的影响

从前面提到的“管口校正”理论可以看出，骨径无疑可以影响骨笛的音高，其影响程度和许多经验参数有关。

由于管乐器耦合作用存在，骨笛振动体为骨管内的空气柱。笔者认为骨管空腔大小应对空气柱体振动发声所产生谐振能量配比、各谐振起始振动状态、以及振动总体能量有所影响。从前面音色和音强理论，二者客观上应有变化。

因此从理论角度来说，骨管直径变化会对音高、音色、音强产生影响

二、骨材质对音响的影响

骨材质对骨笛音色和音强的影响，实践中多数管乐器发声情况已经证明其影响的存在。究其原因：

首先可依“谐音列”理论进行解释，即频谱的变化。骨管材料固体振动参与到空气柱振动的频谱中，形成不同能量配比的谐音列。而且由于骨管材料共鸣性的不同，可能削弱或增强能量释放速度，造成音强的改变。

亦可依“起始状态”理论加以分析。骨管材料促使或者抑制谐音列中特定谐音在很短时间内产生疾巨的能量释放，形成不同的起始状态。

这些都是基于前人成熟理论就此问题的猜测，具体如何影响尚无定论。但仅管乐器材料对音色、音强是否有影响一问，笔者认为应该肯定。

有的学者提出不同意见。Gregor Widholm 在对六支不同材质长笛进行主客

观对比实验后得出结论，认为长笛材质并不会影响音色，而恰恰是人耳因素影响了长笛演奏过程中的音色感觉。[42]

就音高影响而言，仅从频率计算公式来看和骨管材质没有多大关系。但作为边棱音管乐器的激励体，吹口气体涡漩及其碰撞振动必然受到吹口材料孔隙率和材质表面张力及吸附性影响。从振动体来看，空气柱振动的平流和湍流分布情况亦会受到管内表面粗糙度和吸附性影响[⑥]，产生不同的空气柱振动模态。而这些材料参量与材质的密度、硬度、表面粗糙度和弹性模量等有关。

还有管端部分的表面吸附性、孔隙率等因素，可能影响管口校正量，间接改变空气柱的长度。

综上可知，骨材质对骨笛音高、音色、音强都有影响。

三、骨径和骨材质对骨笛音响属性的影响

严格来说，骨管直径大小和骨质变化都应对骨笛音高、音色、音强产生影响。那就必须找到完全相同材质和内外径的骨管，这样做难度太大，可能性很小。只有就骨径、骨质对骨笛音响属性影响程度进行适当的评估，找出其影响程度。

要做到这一点，需要大量的主客观对比实验，结合多学科综合力量才能完成。绝非笔者的研究能力所及，也超出本研究的范围。

所以笔者拟在骨笛相关的一定范围内，根据骨骼样本的特征规定出骨径和骨材质特性的区间。判断此区间变化中，骨笛音响属性所受到的影响是否超出允许的误差范围。如果并不超出误差范围，则可采用骨骼样本进行骨笛复原研究。

第四节 实验结果及分析

通过以上论述，可见骨骼材料个体差异必然会对骨笛音响产生不同程度的影响。为了保证骨笛音响复原研究的准确性，笔者设计简单实验，对骨笛的管长、管径、材质和各项音响属性之间关系在一定范围内进行对比，从而找出三者对骨笛音响属性的影响程度。

具体实验报告请参见附录二。

---

[42]Gregor Widholm《SILVER, GOLD, PLATINUM - AND THE SOUND OF THE FLUTE》
http://iwk.mdw.ac.at/Forschung/english/linortner/linortner_e.htm 2004.9.7

一、实验设计

此实验用以在一定范围内确定骨笛骨径和骨质对骨笛音高、音色、音强三个音响属性的影响程度。

骨径方面，根据《舞阳贾湖》考古报告骨笛尺寸和笔者所取得骨骼样本，管径外径处于 1-2.3 厘米之间，内径处于 0.8-1.5 厘米之间。按照一般的管口校正方法，如比利时声学家马容（V.Mahilon,1841-1924）和美国音乐声学家罗兴的管口校正公式（韩宝强，2003），无论开管闭管，对音高有影响的管口校正量应该和管口内径半径成正比关系。也就是说半径越大，影响音高的量越大，反之亦然。对于音强和音色而言，较大的管径会比较小的管径有大的共振空气腔，此时音强基准值较大，容易观测；频谱基准分布也清楚。

所以笔者选择外径为 20、内径为 14 和 12 的管进行测量，这时，音高影响量变化较大、音强基准大、频谱分布清晰，便于对比实验的进行。

骨材质方面，一是选取密度和鹤骨较相似的 PPR 塑管，二选取了和鹤骨密度相差最远的中碳钢管。在这样的差距较大的两种材料上，如果测定影响量较小，则笔者所取丹顶鹤骨骼复原出的骨笛和7000至9000多年前的骨笛实物之间音响属性差别则会更小。

二、实验结果分析

边棱音管乐器的音高和演奏者的口风、角度、气息等有非常大关系。在实验数据中尚有很多偏差较大的数据，最大方差达到 6.4。测音数据产生偏差和演奏过程中演奏者的控制有关。偏差最大可以达到 10～30 音分。所以在对管乐器的测音过程中，注意避免人为误差是至关重要的。笔者采用去除偏差最大和最小值，降低偏差。去除后数据，方差降低至 3.6 一下，基本符合实验的要求。

1、骨径对音响属性的影响

相同材料、不同管径对边棱音管乐器音高的影响较大。钢管 2 的测音数据较钢管 1 有 10 音分的音高差距，而其内径差距只有 2mm。如果用音乐声学家 Rossing 在《Science Of Sound》（Thomas D.Rossing，1990）一书中提到的管口校正方

法，即开管内壁光滑无指孔的管的管口校正为 2×0.61r，

由：

$$f = \frac{v}{2L}$$

v 为声速，L 为管长（加管口校正）

$$音程差 = 3986.313 \times \log \frac{f_1}{f_2}$$

$$= 3986.313 \times \log \frac{L_2}{L_1}$$

$$= 3986.313 \times \log \frac{l_2 + 2 \times 0.61 r_2}{l_1 + 2 \times 0.61 r_1}$$

$$= 3986.313 \times \log \frac{20.2 + 0.61 \times 1.4}{20.2 + 0.61 \times 1.2} = 10音分$$

L 为管长（加管口校正），l 为管长（未加管口校正），r 为管径

可以得出其音程差恰好是 10 音分，和测音得到的结果完全吻合。

据研究，大多数音乐家的同一性音准感可以有±10 音分的宽容度，平常人较之更宽（韩宝强，2003）。此处 10 音分的音程差，才刚刚到达音乐家同一性音准感宽容度的边界。而且骨笛的内径尺寸一般较 14mm 要小得多，这样管径对音高的影响绝不可能超过 10 音分的音程。另外，由测音偏差数值来看，演奏过程中吹奏口风和角度所产生的偏差较管径所带来的影响大得多，即对于骨笛这样尺寸的管乐器来说，管径的影响亦可忽略不计。如要求严格，亦可根据相关实验结果，用公式加以推理，并进行适当校正来满足要求。

仔细观察钢管 2 频谱和其他三支管的频谱，基本相同，没有特别的能量差异。当然频谱并不是音色唯一客观因素，笔者尚没有足够的实验条件进行其他方面的实验，所以不能判断骨笛的音色和材质因素无关。但就目前实验结果，可以说骨笛管体振动和内表面对空气柱振动影响非常小，可以忽略。

通过频谱图，粗略将谐波声能相加可以发现，骨径对声强影响很小，可以忽略。

2、骨材质对音响属性的影响

不同材料、相同尺寸的管体（PPR1、PPR2、钢管 1），可以看出：去除偏差后的数据平均值之间差距频率保持在 3Hz 以内，音程差距 3 音分左右。由此可以

看出，不同密度、弹性模量、表面粗糙度的材料制成的管体上吹奏所发之音基本相同。换言之，不同材质（密度、弹性模量、表面粗糙度）对边棱音管乐器音高的影响很小，尚不足以让人听出其差异，较演奏时产生的偏差更为小。另外，还可以发现边棱音管乐器对管长和管径的敏感程度比材质要大得多。

对不同材质的管体（PPR1、PPR2、钢管 1），对比其频谱图。可以看出三支管所得频谱基本相同。基音和泛音的位置、能量基本相同；噪声的分布情况基本相同。且均在基本谐音列上伴随一个较为有规律的杂波。如 PPR1 上 #C6+50,G6-45,#C7+51,G7-48,B7-36，笔者认为这些较为有规律的杂波可能是由于气体冲击吹口不同部位而产生的没有引起管体空气柱的耦合振动的气漩撞击，由于拾音器过近而一并采录进来的。此处笔者仅采用频谱进行比较，而对于起始状态没有加以测定，所以结论尚不足以否定材质对骨笛音色的影响。

同样将三管频谱声能相加发现，声强所受影响很小，可以忽略。

3、小结

从实验分析结果，可知在舞阳贾湖骨笛的尺寸和材料特性范围内，骨笛音高受制作骨骼骨径、骨质影响很小。骨笛音高对骨径尺寸变化的敏感程度比骨质变化要大，骨质产生的音高影响可以忽略。相比人耳音准感和演奏时产生的偏差，骨径对音高产生的影响虽不能忽略，但亦在误差范围内。并且在具有一定数据积累的情况下，可以加以校正。

在一定范围内，骨笛频率分布对骨材质的变化不敏感，对骨径变化也不敏感。骨笛管体振动影响空气柱振动的情况没有出现，骨笛振动主要仍是空气柱振动。笔者没有对边棱音管乐器音的起始状态做分析，所以尚不能断言边棱音管乐器的音色和材质无关。待后续实验的进一步验证。

音强方面，人为因素较多。但就实验而言，骨笛音强受骨径、骨材质影响甚微，可以忽略。

第五章 贾湖骨笛复原工作

第一节 骨笛样本的选择

根据《舞阳贾湖》考古报告，共出土25支骨笛。其中给出具体尺寸数据的仅12支，除去汝州博物馆藏0004号和半成品H87:2两支不能作为样本。剩余10支骨笛中，两端完好的仅6支。按照骨笛复原的基本数据要求来看，可以作为样本的仅此6支，而笔者得到丹顶鹤尺骨仅两支。为了让骨笛复原工作更具典型性和独特性，必须有针对性地选取适当样本用于复原。笔者确定M282:20号七孔骨笛和M253:4号八孔骨笛作为复原的样本。

一、对M282:20号骨笛选择

选择M282:20号骨笛，主要考虑到该骨笛在国内外骨笛研究中使用最为频繁，是骨笛最为典型的样本之一。

根据考古报告，M282:20和M282:21骨笛同属骨笛发展中期（萧兴华，2000），在舞阳贾湖文化历史分期上也属于成熟期。从人类历史发展情况普遍规律推测，其制作工艺和音高认识应处于成熟和定型的状态。对于认识舞阳贾湖总体音乐音响情况非常有利。

M282:20号骨笛在所有骨笛中保存最完整、制作最为精美。萧兴华认为骨笛M282:20应为M282:21号骨笛的改进型。他还指出，M282:20骨笛的仿制过程中显然经过精确的计算，并在骨管上打有若干未穿透的钻点用于标记。并且两支骨笛在以往测音中表现出相似的音列形态。可见，M282:20号骨笛在制作过程中就渗入制作者对音列音高的喜好，并尽量将这种选择性音高固化于骨笛。这种原始的音高选择是研究远古舞阳人音准感觉最好的材料。

也许正是M282:20骨笛各方面研究价值的重要性，黄翔鹏首次发表文章就选择它为研究对象。后续的研究也多以它为样本。可见其代表性。

另外对M282:20骨笛的测音研究结果最多，仅黄翔鹏的测音数据就有4组（黄翔鹏，1989），《舞阳贾湖》考古报告提供测音数据更是增加6组。复原此骨笛和原骨笛可以进行一定的比较。对深入研究骨笛大有好处。

再有 M282:20 号骨笛保存完整，复原难度相对较小，偏差容易控制。有利于为今后的复原工作提供经验。

二、M253:4 号骨笛的选择

M253:4 号骨笛，局部残破，测音研究较少，测音数据仅两组，而且精度不高。出土骨笛中像 M253:4 这样的情况不在少数，对它的复原在骨笛研究中具有特别意义。

M253:4 骨笛属骨笛发展晚期，是所有六支骨笛中唯一的一支八孔骨笛。贾湖晚期时间跨度有 400 年的时间，出土数量较少，而仅 M253:4 骨笛可以测音。从其形制来看，相比同期其他骨笛出现时期也应较晚，是研究舞阳贾湖发展后期的唯一材料。

从《舞阳贾湖》考古报告提供的测音数据看，音列音高和中期骨笛音列有较大变化。虽不能仅以其代表晚期骨笛普遍音响特性，但复原 M253:4 骨笛，并和 M282:20 骨笛加以对比，对研究从中期到晚期骨笛沿革情况有重要意义，具有较强代表性。

从乐器改良方面来说，管乐器孔数的增加不仅是听觉音响的需要，也是演奏技巧的变革。当 M253:4 的孔数从中期的七孔增加到八孔，标志着演奏趋于复杂，变化更加丰富，对于骨笛制作也提出了新的要求。复原 M253:4 对于了解这一变革过程有积极的意义。

M253:4 号骨笛中部局部残破。据笔者从当时参与测音工作的顾伯宝工程师处了解到的情况，当时对此骨笛是用胶质物质临时加以修补，并勉强测音。测音的准确性、可靠性无法保证。且测音数据仅两组，远远不能满足研究的科学性和严谨性要求。笔者复原该骨笛，不仅期望以此排除残破所带来的测音误差，而且为今后骨笛修复研究工作提供有益的指导。

第二节 丹顶鹤骨骼的处理和制作

笔者之前虽已有人使用飞禽骨骼进行骨笛制作，但缺少可借鉴的经验，而且制作目的也仅为演奏等非研究性目的。所以笔者复原骨笛也有不断探索和尝试的

过程。最后确定参考《舞阳贾湖》第五章《骨、角、牙制品制作工艺》一节中对骨、角类制品制作工艺的推测。取破料准备、破料、成型、穿孔的制作工序，力求在制作中符合科学性和严谨性。

一、破料准备

《舞阳贾湖》中描述，据民族学的调查材料，对于食余动物骨骼，破料之前需首先将其放入水中浸泡，然后在阳光下曝晒，令其发酵，以便使残余的肌腱易于刮去，最后用清水洗刷干净，去掉腐臭之味。

如果完全按照考古报告中所描述方法，对丹顶鹤骨骼进行处理，笔者认为不仅耗时而且处理过程中容易破坏骨骼。如阳光曝晒下，骨骼容易过于干燥而破裂。丹顶鹤骨骼来之不易，任何风险都应考虑。

仔细分析考古报告中描述的方法，不难发现整个处理过程就是氧化分解骨骼上粘连的有机组织。只要使用适当的氧化剂代替自然方法，就可以快速有效地达到处理目的，并避免损坏制作材料。

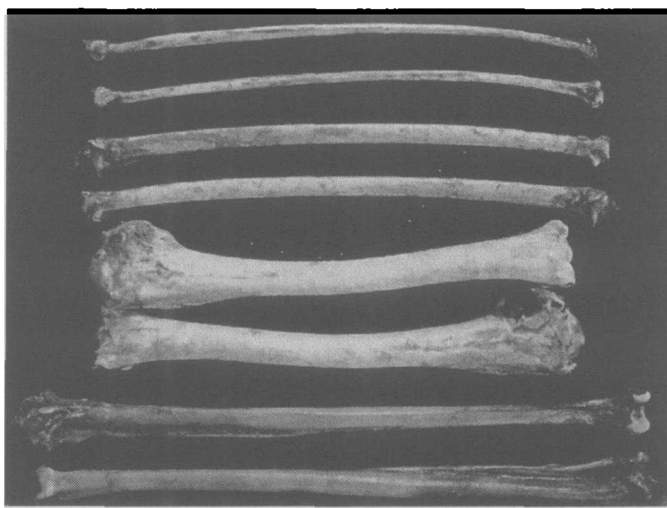


图 5-1：处理前的骨骼

有机化学上常用对油脂、有机组织分离的实验方法中较常用的氧化分离剂有双氧水（H_2O_2）。H_2O_2 为常温下无色透明液体，在空气中化学性质不稳定，易失去氧离子并还原为水（H_2O）。双氧水高浓度时具有很强的氧化性，不过相比其他强氧化剂，氧化性适中，短时间内不会影响骨骼的材料性质。

笔者选用 30%浓度的双氧水，注入 500 毫升量筒中。将已经初步剔除肉丝和

筋头的尺骨和胫骨浸泡其中，静置 60 分钟后取出—用手术刀将氧化后骨骼上的有机质残余剔除，得到干净骨骼。由于部分骨骼取自病死丹顶鹤，为防止骨骼携带病菌，满足测音吹奏的需要，取另一 500 毫升量筒注入 500 毫升 97%医用酒精，将处理好的骨骼浸泡其中备用。

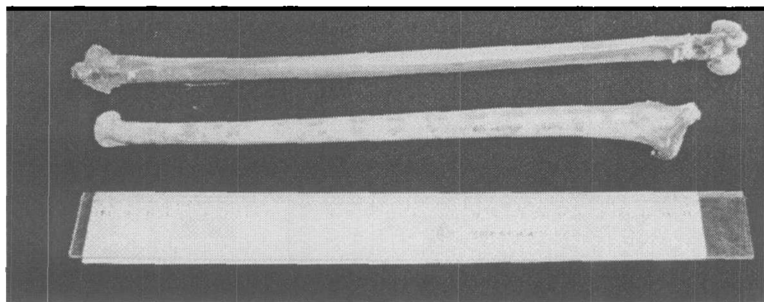


图 5-2：处理后的骨骼

二、破料

骨骼处理好之后，紧接着对其进行加工，即考古报告中提到的破料。《舞阳贾湖》一书中所提到破料方法有三种，分别为锯割法、砍斫法、锤击法。丹顶鹤骨骼质硬而较脆，用砍斫法和锤击法显然不能达到骨笛的加工要求。笔者依据骨笛实物图片，参考考古报告提供 M282:20、M253:4 骨笛长度尺寸，采用锯割法，选用 0.5 毫米钢锯将尺骨两端的骨关节锯除，并给进一步加工留有长度余量。

骨关节锯除后，骨管两端处有大量纵脊和骨刺，骨管内充满骨髓。参考考古报告的做法，先用洗耳球沿骨管吹去其中的骨髓，并用高速水流冲刷骨管。再用小锉将骨纵脊和骨刺锉除磨平。

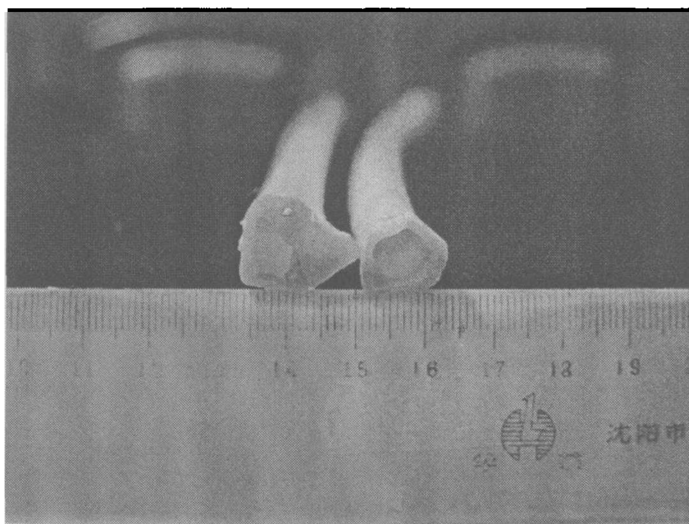
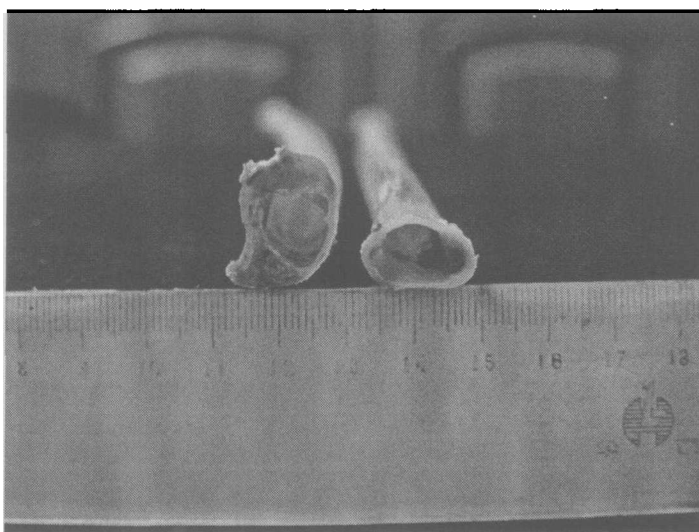


图 5-3：胫骨小端（左）和尺骨小端（右）


图 5-4：胫骨大端（左）和尺骨大端（右）

三、成型

破料后骨骼，已成通体光滑的骨管，不需要进一步修磨。但两骨管长度较两支样本骨笛长度均有超出，需进一步加工。那么修整的方式至少三种，其一以一端（可以是大口端或小口端）为基准，切割另一端达到规定的管长。其二就是模拟复原母本，找出骨管两端之间特征点的位置为基准，切割两端达到规定管长。

尺骨骨管非均径管，管径随管长变化而发生变化。由于骨骼自然生长差异，如果选择第一种方法确定管长，虽可保证一端管径尺寸，但另一端的管径则无法控制。根据管口校正理论，如果不能控制管径在一定的误差范围内，则有可能导

致骨笛音高变化过大，这无疑会影响复原骨笛音响。如果仅从外管径对内管加以粗略估计，目测误差较大。

通过前面对丹顶鹤骨骼的论述，不难发现在丹顶鹤尺骨上有一个特征纵脊贯穿小孔。笔者萌发以此小孔位为基准来校正管长的想法，经过粗略估测，管径的误差应该可以控制在 0.05 毫米以内。于是付诸实施。在保证管长的前提下，最后管径误差控制在 0.1 毫米以内。

四、钻孔

《舞阳贾湖》中详细记录了舞阳人钻孔技术的研究结果。文中通过对音孔处纹理细部放大研究发现，骨笛音孔应为钻头螺旋往复转动开成。

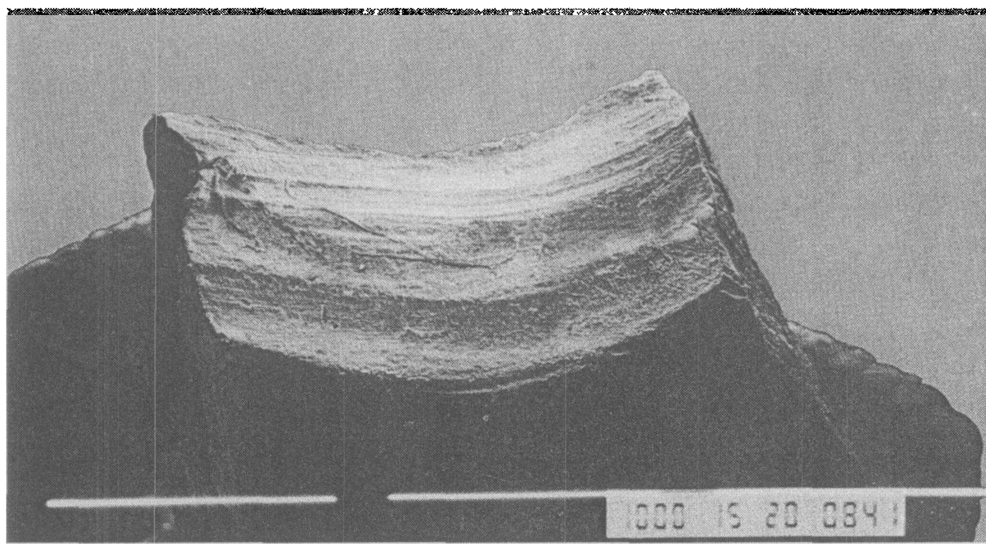


图 5-5：骨笛音孔的放大图像（河南文物考古所，1999）

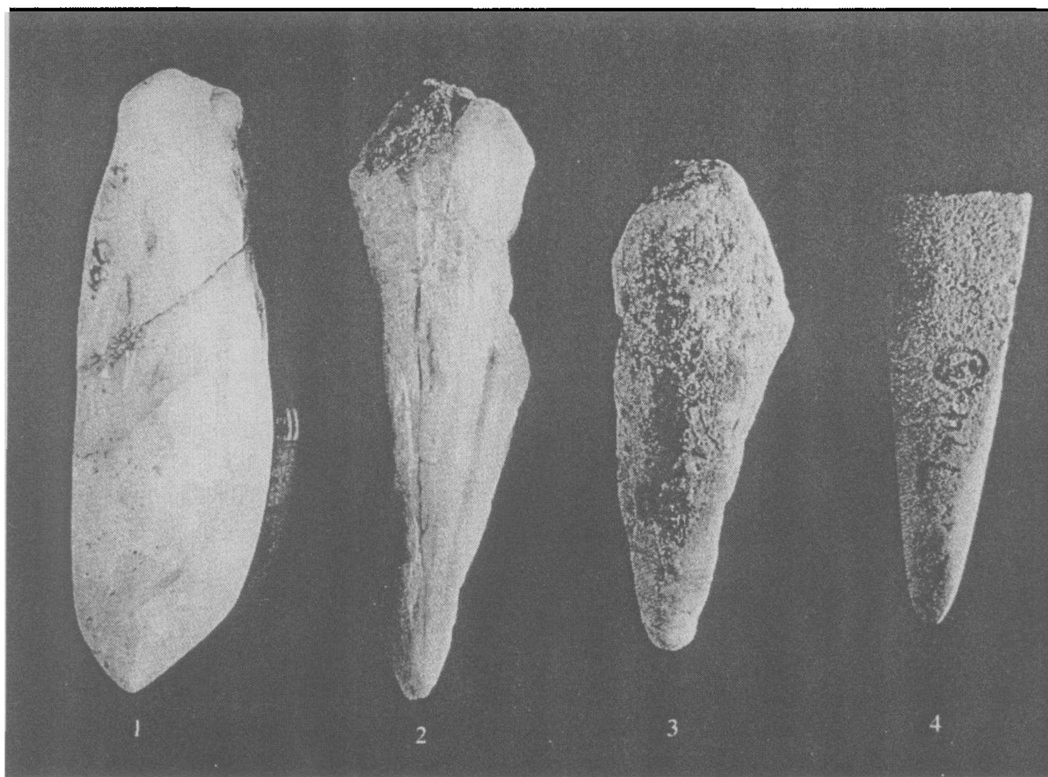


图 5-6：骨笛钻头图片（河南文物考古所，1999）

笔者曾采用类似出土钻头的器物在骨骼切割过程边角料上螺旋往复施钻，但终因骨骼非常坚硬而难以钻入。另外采用此种钻法不易控制音孔直径，而且容易造成骨管的损坏。鉴于骨管材料来之不易，笔者最终采用台式钻床加钢质麻花钻头进行螺旋低速施钻。

笔者使用华明 ST 系列台式钻床，配合使用 1.5 毫米、2.5 毫米、3.0 毫米和 3.5 毫米麻花钻头。为了避免钻头过大或转速过快，而产生巨大扭力损坏骨管。笔者采用最低钻速，直径由小到大依次使用钻头。先用 1.5 钻头在骨管上打出钻点，然后施钻，再依次使用大一级的钻头扩孔至所需孔径。

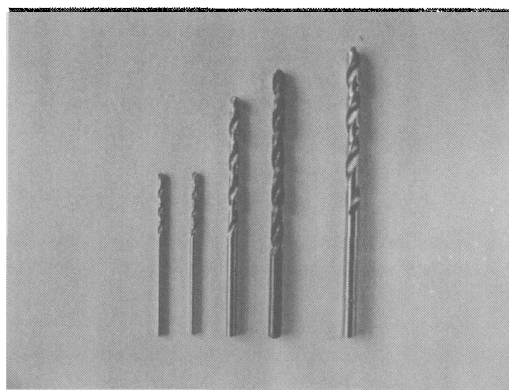


图 5-7：钢质麻花钻头

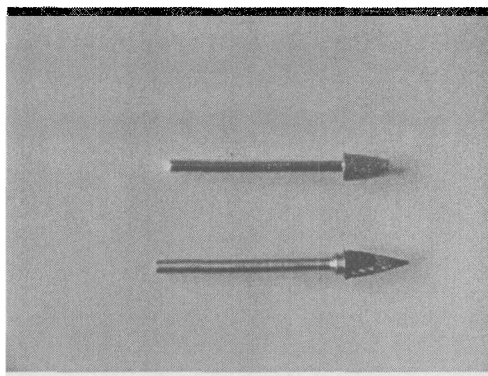


图 5-8：椎形加工磨具

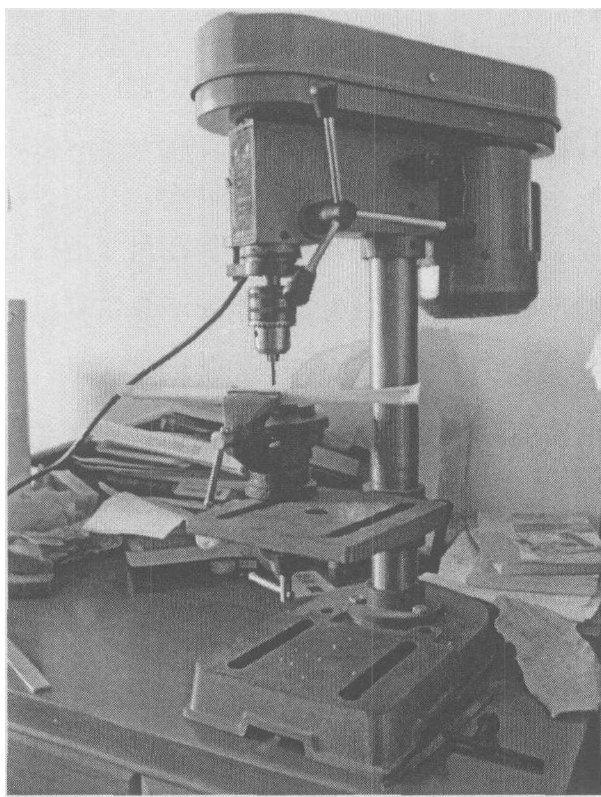


图 5-9：ST 系列台式钻床钻孔图 包括夹具

其中 M282:20 号骨笛七个音孔均为 3.6 毫米，直接以 3.5 毫米钻头开钻，并用锥型磨具适当扩孔至规定尺寸。小七孔为 1.5 毫米，以 1.5 毫米钻头钻成。M253:4 的八个音孔为内径 3.0 外径 4.2 的椎形孔，先用 3.0 钻头钻至 3.0 毫米音孔后以椎形磨具加工至规定尺寸。尺寸度量工具是全长 25 厘米，精度为 0.02 的游标卡尺。

经过以上四道工序，完成骨笛复原制作

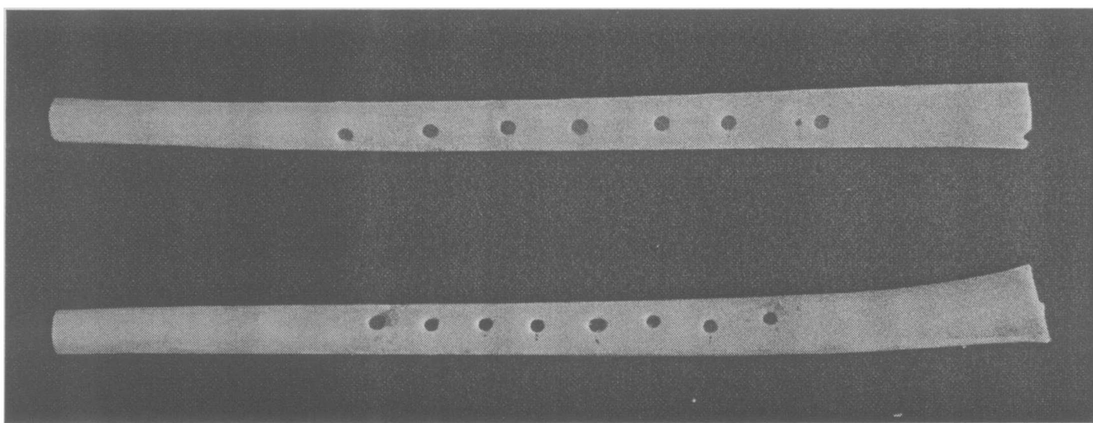


图 5-10：完成后的骨笛复原品 M282:20（上）、M253:4（下）

第三节 复原工作经验总结

经过破料、成型、钻孔三道工序，复原骨笛在尺寸指标上基本符合《舞阳贾湖》考古报告所刊登的骨笛线描图尺寸。笔者对于骨笛复原工作中工序选择、错误修补、误差避免等方面的经验总结如下。

首先，必须对所需的骨笛复原尺寸数据进行验证。骨笛的尺寸虽然出于正式的考古报告，但制作者应该充分估计到论文文献和报告出错的可能性。无论是印刷错误还是人为测量或计算错误都必将影响到最后的骨笛制作精度。如 M282:20 号骨笛公布线描图中，全长最长处为 22.7 cm，最短处为 22.4 cm。而将所有孔据相加之后却得出全长最短为 22.51 cm，出现 0.11 cm 误差。同样的问题出现在 M253:4 号骨笛上，M253:4 骨笛全长最长处为 22.7 cm，最短处为 22.3 cm。用 22.3 分别减去前八孔的长度，得到最后一段，即八孔到管末端距离应为 6.2cm。而图中给出的尺寸为 6.8cm，相差 0.6cm。鉴于这些差异，笔者不得不对原有数据进行适当修正。对 M282:20 骨笛，笔者慎重起见，按照 22.51cm 进行加工，以便日后发现有错，进行二次加工。而对于 M253:4 骨笛，通过《Nature》发布的图片（JUZHONG ZHANG，1999）（图 3-7）观察可知，M282:20 和 M253:4 骨笛全长基本相似，不可能差异 0.6cm。所以将八孔到末端的长度修正为 6.2cm，而保持全长 22.7cm。笔者在此特别提醒读者注意。

第二，从笔者复原骨笛的经验来看，由于鹤骨骨质坚硬且脆，无论是钻孔或是磨锉时都不宜过于用力。所以在钻孔时应采用从小到大不断钻扩的方法，减少施加在骨管上的扭力。在磨锉时也应尽量采用锉纹较细的刀锉或砂粒较细的砂

纸。

第三，使用钻床进行加工时，应该选用固定能力较好的夹具将鹤骨固定于钻床平台上。笔者使用台钳，加工过程中曾出现过由于固定不稳，造成鹤骨偏移的情况，略微出现一些钻孔偏差。对于已经造成的偏差，笔者用胶质调和钻磨下来的骨末，对偏差进行了校正。修补情况可见图 5-10 中 M253:4 骨笛复原品图片。

最后值得一提的是，骨笛的复原工作所采用加工工具均为现代工具，比新石器时代的石制工具要先进得多。在工具如此发达的今天，制作骨笛也并非轻而易举。制作骨笛的古代先民的手工技术之精湛可想而知。

第六章 骨笛测音工作

贾湖骨笛测音数据是研究舞阳贾湖地区为代表的中原古代文化音乐形态的重要依据，判断这些数据准确与否完全依靠测音工作的科学性和合理性。同时，测音工作直接关系到贾湖骨笛音响复原研究的成败。所以测音方法和规范的研究是音响复原研究中重要的环节。而且，对管乐器测音方法和规范系统地梳理，也有助于实践和验证以往贾湖骨笛测音研究科学性、合理性。笔者在此不厌繁复，用一定的篇幅对边棱音管乐器测音方法和规范加以总结。

第一节 乐器测量概述

乐器测量属于音乐声学测量的一部分。音乐声学测量是为了解决音乐音响问题而建立的一套独具特点的测量体系。它从理论角度源于普通声学测量，但由于音乐声学在具体测量对象和精度上有别于其他普通声学测量，导致其在设备要求和操作方式上形成了自己的特点。

音乐声学测量从手段上来说，分为客观测量和主观评价。客观测量是用物理声学方法对音乐信号进行测量，为音乐声学研究提供客观数据；主观评价则是用人的听感对音乐信号作出定量或定性的评价。目前，建立在单纯个人主观感觉基础上的音乐理论已经远远不能满足音乐学研究的需要。特别是在诸如律学、民族音乐学、音乐考古学、音乐形态学，乐器学和音乐心理学等领域。所以在理论研究中音乐声学测量多为客观测量。（韩宝强，2003）

音乐声学测量项目从总的类型上来说，分为基础性测量项目和应用性测量项目。基础性测量项目是与乐音的性质有关的主客观测量；应用性测量项目是与音乐实践有直接关系的测量。对于乐器（包括改良乐器和出土古代乐器）音高、音色、音强以及灵敏度等方面的测量属于后者。

乐器声学测量工作最终目的，是获得能真实反映乐器声的准确数据。严格来说，由于乐器声学构成的多样性和复杂性，每种乐器的测量都有其特殊之处，要根据乐器特有的声学构成进行特定的测量。并不存在一种放之四海皆准的测量方法。

萨克斯-霍恩博斯特尔乐器分类法根据乐器声学振动体特性对乐器进行分

类，由于不同乐器分类在声学振动体特性上具有一致性，为不同乐器测量方法的确定提供了很好的参照。不过在应用霍-萨乐器分类法的同时，还应该注意乐器的音响属性并不仅仅取决于乐器的振动体特性，还会受到乐器其他部分，如激励体、共鸣体、调控装置的影响。所以应该发展地看待霍-萨乐器分类法，在确定乐器测量方法时应对霍-萨乐器分类法的细化分类给予格外的重视，而且不能忽视对其他声学因素的影响。

第二节 边棱音管乐器声学特性

边棱音管乐器在霍-萨乐器分类法中属气鸣乐器类，其下分为吹孔和哨嘴等类。这两类还可以细化为单管、多管、罐体等，根据演奏法的不同还可以分为横吹、竖吹、鼻吹等。

边棱音管乐器是以边棱音作为激励源的管乐器。边棱音管乐器的发声原理是当一股气流以一定角度射向一个带有尖锐边缘的管子入口时气流被分为两股，形成上下两个分力的气体涡漩，涡漩之间随之产生空吸，导致相互碰撞而产生振动。振动和管子中的空气柱产生耦合而产生音响。可见边棱音管乐器的激励体来自气体振动；管内的空气柱既是乐器的振动体也是共鸣体；调控装置呈现多样性，大多数管乐器上都是通过开音孔来改变振动体的长度。

边棱音管乐器发声原理决定了它的声学特性，首先是边棱音和气流角度、流速的关系。边棱音的频率取决于气流对边棱喷射角度。在边棱音产生的许可范围内，角度越大频率越高；当角度变化超过一定范围，就无法激励边棱音；气流速越快，乐器声强越强；角度和流速变化还可以产生超吹现象，即抑制基音而突出基音上方的泛音。

耦合是在所有管乐器上都存在的声学现象，它是激励振动和管内空气柱横波振动的相互作用。激励振动引发空气柱振动，空气柱振动反过来使激励振动离开自己的固有频率，而以空气柱振动基频或谐振频率振动。同时在激励振动和空气柱振动频率相近时，激励振动也可能使空气柱振动频率升高或降低，来配合激励振动的频率。对于其他气鸣乐器，如簧鸣、唇鸣乐器等，由于激励振动为固体振动，较为稳定，所以耦合情况还略显简单。而在边棱音乐器上，耦合的双方都是气体振动，无论从稳定性和演奏者控制力来说，都较其它管乐器复杂得多。

管口校正是由于管内振动空气柱造成管口处气体参与空气柱振动，而产生管内空气柱振动体长度较实际管长大的声学现象，这一现象在管乐器上普遍存在。边棱音乐器的管口校正量由于其发声原理的特殊性，可变性较大。边棱音乐器无论是有无吹口或有无哨嘴，演奏者都需要将气息灌注于一气流以形成一定方向对边棱的激励，这样演奏者吹嘴与边棱总要保持一定的距离，以满足激励边棱的需要。在这个距离中，气流大小和角度会直接影响边棱音管乐器气柱振动在吹口处溢出的多少。如果距离较短、气流速大、角度大，则必然溢出较少，反之，则溢出较大。除在有哨嘴的边棱音乐器，如竖笛上，由于其乐器的结构特点，影响较小，其它边棱音乐器大多无法避免。

还有，边棱音乐器和多数的管乐器一样，空气柱振动为横波。由于管内壁结构和音孔大小不同，空气柱振动的情况会有所不同。在管内径和管长过大或过小的情况下，由于激励能量的大小限制，空气柱较难起振，产生虚音或根本吹不响。而音孔所开大小和管径、管长之间关系必须符合一定范围，否则也会导致无法起振。笔者接触过许多制笛艺人，他们在选择制笛材料是总是有一定的标准，竹管的管径大小和截取的长度必须在一定范围内，而且二者必须符合一定关系才可以用于制笛。在为笛开孔时也有相应的规矩，只有在孔径达到一定范围后才可以根据实际音高需要加以调整。

另外，边棱音乐器可以像弦乐器揉弦或滑指那样奏出波动音和滑音。波动音可以通过嘴唇轻微的起伏或调整气流，改变气流和气速来达到。滑音则是通过改变吹奏角度和抹音孔来实现。（韩宝强，2003）

综上，由于边棱音乐器独特的声学特性，其音高、音色、音强、灵敏度等乐器音响指标不仅会受到乐器结构方面，如管径、管长、音孔大小等客观量的影响，而且对于演奏者的演奏技巧、习惯，吹奏角度、气息大小、嘴唇的控制能力等主观因素非常敏感。另外由于边棱音乐器无论振动体、激励体还是共鸣体都是空气，空气湿度、温度、气压等对乐器的影响也不容忽视。总之，边棱音乐器的音响属性稳定性很差，受人为因素的影响非常大。

第三节 边棱音乐器的测音方法和规范

乐器测量旨在客观地反映乐器的音响属性，只有根据乐器的声学特性确定相

应的测量方法，制定相应的测音规范，才能尽可能地保证测音的客观性。所以笔者拟从测音方式、测音设备、测音步骤、结果统计四个方面来阐述边棱音管乐器的测音方法和规范。

一、测音方式

关于测音方式，笔者认为按照吹奏的不同，可以分为人工测音或机械测音；按照测量的方式来分，有静态测音或动态测音。

1．人工嘴测音和机械嘴测音

人工嘴测音指：采用演奏者吹奏边棱音乐器，发声并记录的方法。而机械嘴测音则是指：运用机械手段模拟边棱音乐器吹奏时的情况，发声并记录测音结果。以骨笛测音为例，人工嘴测音就是以往贾湖骨笛的测音研究方法，用人嘴演奏的测音方法；机械嘴测音可以采用物理或化学手段产生一定方向的稳定气流，对骨笛边棱进行激励，也就是俗称的“机械嘴”。

机械嘴“吹奏”在得到客观有效的测音数据方面似乎比人工嘴测音要容易，其实不然。乐器是由人来演奏，机械嘴所测得的数据并不能代表实际演奏乐器的音响。人在吹奏乐器时气息的角度和流速不断发生变化，在此过程中不断寻找最佳的耦合频率。这个最佳频率才是乐器实际演奏中的音高，而且人耳对音高、音色和音强的选择也会不自觉地调整这一音高，机械嘴难以做到这一点。实际边棱音乐器测量过程中多采用人工嘴测音。机械嘴测音虽然达不到人工嘴测音的效果，但机械嘴可以避免边棱音乐器的人为因素，有校正人工嘴测音的作用。有条件的情况下，可以结合人工嘴和机械嘴进行测音。

从演奏者角度讲，一些常见管乐器具有技巧纯熟的演奏者，而一些罕见乐器、如古乐器、出土乐器等，往往就没有。因而对于常见管乐器，应该请有演奏经验的专家进行测音吹奏。因为只有他们真正了解乐器的性能和正确的吹奏方法，并对乐器的音响属性有其经验的心理预期。对于那些罕见乐器，特别是出土的古乐器，就不应该选择专业演奏其他乐器的人员进行测音。因为专业演奏人员往往在其他乐器上已经积累了一定的乐器演奏经验，在吹奏过程中必然将这些经验强加于乐器上，而造成研究者对这些乐器的误解。黄翔鹏在骨笛测音研究中曾提出“为

求发音最自然，避免出自主观倾向的口风控制，未请专业演奏人员参与”。

另外，边棱音管乐器的人工嘴测音中还应该注意，吹奏方法和气息运用的一致性。前面已经提到，边棱音管乐器音响属性受人为因素影响非常大，所以在以往骨笛测音研究中，测音人员都力求保持一致的气息和口风。但遗憾的是，目前对于骨笛的吹奏方法，还没有形成统一的认识。笔者自己吹奏复原骨笛的经验，斜吹法容易实现，声音也较为自然。而类似箫的自立竖吹较难实现，笔者从未吹响。

对于骨笛这样的出土古乐器，其文物价值超过实用价值，所以在人工嘴测音中应该充分地考虑到文物保护需要。据有关考古工作者的介绍，骨笛在进行人工嘴测音后，发生了不同程度的人为破损。这些破损大多由吹奏时进入管体温湿空气造成，这足以提示今后的此类测音工作应该更加慎重。笔者认为采用机械嘴测音，对此类重要文物保护和测音都非常有益。

2. 静态测音和动态测音

静态测音是指：对于乐器所发乐音逐一进行测量，确定其音高、音色、音强的过程。其中乐器乐音并不从乐曲进行中拾取，而由演奏者单独演奏。而动态测音是：拾取乐器演奏乐曲当中的乐音，确定其音高、音色、音强的过程。动态测音可以了解乐器乐音在运动着的乐曲中音响情况，但对测音设备和录音设备保真性和实时性提出了新的要求。

由于计算机音频和测音技术的不断提高，有人提出应该以动态测音替代静态的测音。笔者认为应该具体问题具体分析。对于定音性较好，如钢琴、扬琴等乐器，采用动态测音，可以保证测音过程的准确性，而且对乐器演奏过程的动态研究不无好处。当对于声乐、管乐器这些受人为控制较多的乐器，如果采用动态测音不仅不能提高测量的精度，反而会适得其反，影响测量的客观性。动态测音大量拾取乐器演奏中的音过程，将许多乐器的过程音和非稳定音也纳入到测音的范围中。加上主观听感在演奏过程中会影响乐器音响属性。以音高为例，进行中的乐曲相邻乐音之间的音程会受演奏者不自觉的控制，演奏者会控制音程符合其听觉感觉预期。这样一来，测音反映的不是乐器本来的音高，而是演奏者的心理音高。所以相比动态测音，边棱音乐器静态测音更有利于得到相对准确、稳定的测

量结果。

实际上动态测音和静态测音从实质上来说，没有本质的区别。它们都是选取特定的音进行测量，只不过选择的时机不同而已。当然动态测音也有其独特的作用，它是了解乐器实际演奏中音响过程的重要手段。对于传统音乐中常见的音腔等音乐形态学现象，动态测音分析十分必要。所以笔者认为两种测音方法各有利弊，在乐器测量中应结合使用。

以往骨笛测音研究中，由于测音设备和技术的原因，全部采用静态测音。对于骨笛这样的边棱音乐器，静态测音是完全正确的选择。同时，笔者认为为了进一步了解骨笛的乐器性能情况，进行适当的动态测音也很有必要。另外有《Nature》网站所提供的骨笛演奏录音作为参考，分析当时录制的相关情况，有助于全面的了解骨笛音响。

二、测音设备

以往的骨笛测音，录音技术不发达时，尽量使用现场声源（一次声源），忌讳使用录音声源（二次声源），因为劣质录音肯定不能真实反映声音的本来面目，其测量结果必然失真。随着录音器材的不断改良，特别是数码高保真录音技术和计算机技术的日新月异，磁带录音被低噪声，无抖晃的数码录音所替代，一次与二次声源之间的差异越来越小。二次声源反而有更多的优点：第一，测量工作可以在实验室环境中进行，排除将测量仪器搬到现场而带来的环境干扰（如温度、电压、环境噪声等），保证数据的精确度。第二，在测量过程中，为了捕捉到最佳信号点，声源可不断反复，高保真录音声源可以反复播放并保证重复的一致性，现场测量则无法做到这一点。所以基于计算机的高保真数码录音是测音研究的首选。[43]

计算机的普遍使用，让测量分析的准确性大大提高。70 年代对骨笛的测音采用 Stroboconn 闪光频谱测音仪，测量结果显示不直观，需要测音人员目测转子情况而定。到 80 年代 90 年代有所改进，采用 B&K2032 双通道频谱分析仪对曾侯乙编钟进行测音研究（韩宝强，1999）。而时至今日，计算机音频软件的飞速发展，数字音频的快速傅里叶变换功能实现已经非常容易，借助计算机软件频谱

[43]韩宝强、刘一清、赵文娟 《曾侯乙编钟音高再测量兼及测音工作规范问题》中国音乐学 1999 年 3 月

测音，快速而准确的优点，使它已经成为声学测音的主要方法。

笔者在贾湖骨笛音响复原中，就采用计算机软件进行频谱测音。所用录音设备和软件包括：AKG C1000s 电容传声器、计算机软件包括 Adobe Audition 2.0、Steinberg Nuendo 3、通用音乐检测系统 GMAS。

三、测音步骤

由于边棱音乐器受人为因素影响过大，为了测音的准确，必须进行多次测量求取平均值。同时还需要考虑采用连续测音还是随机测音。

连续测音是指：在乐器音域范围内，按照一定的音列顺序，连续加以测试。音列顺序可参照特定测定指标预先设计好。如以音高为标准制定的音列，上下行顺序连续测定。重复多次测音，求取平均值。而随机测音则是：随机选取乐器上某几个音位乐音，进行重复测音。测音顺序并不依据任何预定程序进行，而是随意选取。

两种测音方法相比，连续测音较随机测音更能反映出音乐的自然状态。因为连续的测音顺序，不仅方便测试者演奏、记录和分析，而且乐器音响完整概念与渐变音乐特性相吻合。随机测音则显得紊乱且不完整，无法形成一定的音乐感觉。而且对测试者的记录、分析和吹奏者的演奏提出更高的要求。

笔者认为两种测定方法在适用乐器范围上应该有所区别。随机测音往往较适用于定音性乐器的测量，如钢琴、编钟等。连续测音则适用于非定音乐器。因为定音性乐器，各音位音基本固定，只需随机选取个别音位进行测量即可。而非定音性乐器，各音位有较大游移，随机选取难以得到准确的乐器音响。

但是，在实际乐器测音中，连续测音和随机测音究竟采用何种，不能简单根据定音和非定音来决定，应该具体问题具体分析。骨笛属于定孔乐器，在原则上来说，应采用随机测音即可。但在对骨笛了解不多的情况下，简单地采用随机测量显然不能反映出乐器的音响全貌。

以往对骨笛测音方法，均采用连续上下行测音的方法，对骨笛采用连续测音方法完全正确。但笔者认为应该注意避免连续测音过程中的人为影响因素。连续测音大多数情况下以音高为标准设定测音顺序，演奏者在连续上下行中容易形成音高感觉的惯性，将其音高感觉的预期加入到演奏过程中。正如前面多次提到的

那样，边棱音管乐器音响属性受人为因素影响非常大，演奏者的音准感觉非常容易影响乐器音高。且骨笛是无吹口的边棱音管乐器，它具有边棱音管乐器的声学特性。同时由于骨笛没有吹口，需人嘴和骨管端成一定角度，而形成自然吹口才能吹奏，更增加了骨笛音响属性的人为影响因素。所以采用连续测音方法必然产生人为误差。

所以笔者认为在连续测音中尽量避免人为因素的干扰。以往的测音研究在这方面尚有欠缺。当时参与测音的人员或多或少地具有十二平均律的音准感觉，进行测音过程中，难免在连续上下行测试中不自觉地依据自身音准感觉，产生细微的口风、气息变化。笔者曾在复原骨笛上做过尝试，通过细微口风、气息变化，也可以吹奏出基本符合十二平均律的各个音程。

通过以上分析，笔者认为将连续测音和有一定时间间隔的吹奏结合起来是复原骨笛测音的最佳解决方案。即仍按照一定音高顺序组织连续测音过程，同时在相邻单音测量之间插入有一定的时间间隔或重复单音，割断其时间的连续性。使演奏者不会因连续音高变化，产生过强的音程感觉，从而防止演奏者通过细微演奏调整将主观听觉感觉不自觉地融入到测音过程中。

四、结果统计

对测音数据进行理性的分析和统计，是边棱音管乐器测音中重要一步。边棱音管乐器声学特性决定了这类管乐器音响的不稳定性。反映在测音结果中，必然出现个别音音色、音强异常，音高数据偏离过大、游移不定的情况。这时就需要测音者对数据进行合适的分析和统计。

对于音色不饱满、音强异常的音，应不予采用。前面提到过，边棱音效应只在一定角度和气流流速情况下才能出现，测音过程难免产生无效或不完美的边棱音振动。这样的激励振动，有可能和空气柱的耦合作用先天不足，而造成音色、音强异常的情况。另外耦合需要吹奏者具有一定的演奏技巧，如果是非专业人员进行测音，耦合作用不充分或不完美，带来乐器声的不稳定。其实边棱音管乐器有很多复杂的振动情况可以导致发声的不稳定，如果将这些音纳入到结果分析的范围，势必影响最后的分析结果。

边棱音管乐器在某些音孔上可能出现一孔多音的情况，在这种情况下应该选

择音色较为饱满的进行测音。边棱音管乐器管内振动复杂，在某些音孔上可能出现一孔多音，而各音差异较大的情况。笔者在复原骨笛吹奏中就遇到这样的情况，特别是在管径较小的骨笛的低音区和高音区。笔者分析出现的原因可能是：第一，低音区时，送气量较大，而气速较小，管内气体形成平流，起振困难，而产生不稳定的多种气柱振动。第二，高音区时，送气量小、气速快，管内气体形成湍流，起振容易而且复杂，加之管径较小，亦容易产生多种空气柱振动。笔者就采用听觉和频谱相结合的方法，选取音色饱满、音强较大、频谱丰富的音。在某些音孔上还出现多个音音强、音色都很稳定的情况，笔者根据管乐器频率公式，选取振动体最短、频率较高的音进行测音。

边棱音管乐器超吹较其他类管乐器容易，这和边棱音效应有很大关系。所以在测音中要注意区别超吹音和正常音。并且笔者认为边棱音管乐器测音中可以适当使用超吹音对乐器发音进行校正。在一孔多音的情况下，加快气速，产生超吹，记录其频率。然后按照超吹音和正常音之间八度或五度的关系对乐器音高进行校正，有助于正确找到乐器音孔的音位。而且，如果有条件的话，将超吹音也进行测音，可以使测音结果更加全面。

最后需要提出的是，很多人在测量边棱音管乐器时，某一音孔出现哑声，找相邻易吹的音孔先发声，然后迅速变换指法至出现哑声的音孔，使其发声。笔者认为这样做在边棱音乐器测音中应该尽量避免。因为这样和连续测音类似，会将测音者对音高的心理预期强加到音孔上，使测音产生偏差。

第七章 结果分析与讨论

对复原骨笛样本进行测音是研究骨笛音乐形态和价值的重要步骤。本章以实验报告中的数据为依据，将贾湖骨笛复原品和原件进行比较分析，并就骨笛相关焦点问题展开讨论。

有关骨笛复原品测音报告详细内容见附录三。

第一节 复原骨笛静态测音结果分析

一、M282:20 号骨笛复原品与原件测音的比较

1. M282:20 骨笛堵小七孔时的测音

摘自附录三中数据表格，M282:20 号骨笛测音堵小七孔统计数据，列举如下（单位：音分）。

孔数	堵小七孔（上行）音高		相邻音程	堵小七孔（下行）音高		音程相邻
筒音	816.6276	F5+17		831.9632	F5+33	
			230.1896			209.7423
七孔	1046.817	G5+47		1041.706	G5+42	
			207.5331			163.5488
六孔	1254.35	#A5-46		1205.254	A5+5	
			166.5377			220.6452
五孔	1420.888	B5+21		1425.9	B5+26	
			220.4653			173.3757
四孔	1641.353	#C6+41		1599.275	#C6-1	
			189.0407			231.3921
三孔	1830.394	#D6+30		1830.667	#D6+31	
			244.2778			282.7392
二孔	2074.672	#F6-25		2113.407	#F6+13	
			351.0227			313.3053
一孔	2425.694	A6+26		2426.712	A6+27	

表 7-1 复原骨笛 M282:20 堵小七孔测音数据统计分析

根据《舞阳贾湖》考古报告中测音数据，M282:20 号骨笛堵小七孔测音共 5 组。数据列举如下，并进行适当统计分析。单位：音分

	孔数	1	2	3	4	5	平均值	音名	相邻音程
堵小七孔（上行）	筒音	946	950	960	869	890	923	#F5+23	
									254.2
	七孔	1185	1196	1196	1169	1140	1177.2	A5-23	
									178.6
	六孔	1365	1378	1370	1348	1318	1355.8	B5-44	
									151
	五孔	1524	1535	1515	1490	1470	1506.8	C6+7	
									198.2
	四孔	1780	1711	1710	1654	1670	1705	D6+5	
									186.2
	三孔	1908	1911	1913	1854	1870	1891.2	E6-8	
									226
	二孔	2145	2145	2160	2066	2070	2117.2	#F6+17	
									347.6
	一孔	2445	2482	2466	2461	2470	2464.8	#A6-36	
堵小七孔（下行）	筒音	946	969	960	890	898	932.6	#F5+33	
									236.6
	七孔	1189	1202	1187	1123	1145	1169.2	A5-31	
									191.8
	六孔	1389	1393	1370	1318	1335	1361	B5-39	
									146.8
	五孔	1540	1545	1537	1450	1467	1507.8	C6+8	
									180.8
	四孔	1740	1745	1737	1566	1655	1688.6	D6-11	
									221.6
	三孔	1948	1945	1937	1866	1855	1910.2	E6+10	
									211.4
	二孔	2118	2182	2182	2066	2060	2121.6	#F6+22	
									355.4
	一孔	2481	2482	2472	2480	2470	2477	#A6-23	

表 7-2 骨笛 M282:20 堵小七孔测音数据统计分析

分析：对比以上两表，不难发现在堵小七孔情况下，复原骨笛和原件骨笛所有音孔在绝对音高上有较大差异。上行相差的最大音分数为 130 音分，最小也有

39 音分；下行相差最大相差音分数为 155 音分，最小为 8 音分。

	复原品（上行）	原件（上行）	差异	复原品（下行）	原件（下行）	差异
筒音	816.6276	923	106.3724	831.9632	932.6	100.6368
七孔	1046.817	1177.2	130.383	1041.706	1169.2	127.494
六孔	1254.35	1355.8	101.45	1205.254	1361	155.746
五孔	1420.888	1506.8	85.912	1425.9	1507.8	81.9
四孔	1641.353	1705	63.647	1599.275	1688.6	89.325
三孔	1830.394	1891.2	60.806	1830.667	1910.2	79.533
二孔	2074.672	2117.2	42.528	2113.407	2121.6	8.193
一孔	2425.694	2464.8	39.106	2426.712	2477	50.288

表 7-3 复原骨笛 M282:20 和原件堵小七孔绝对音高比较

分析：在堵小七孔情况下，复原骨笛和原件骨笛之间音程关系上差异却并不大。上行差异较小，最大的差异不过最大音差 29 音分。下行差异较大，差异大多超过 24 音分。且其中六孔至五孔和三孔至二孔达到 70 多音分的差异。

	复原品（上行）	原件（上行）	差异	复原品（下行）	原件（下行）	差异
筒音至七孔	230.1896	254.2	24.0104	209.7423	236.6	26.8577
七孔至六孔	207.5331	178.6	-28.9331	163.5488	191.8	28.2512
六孔至五孔	166.5377	151	-15.5377	220.6452	146.8	-73.8452
五孔至四孔	220.4653	198.2	-22.2653	173.3757	180.8	7.4243
四孔至三孔	189.0407	186.2	-2.8407	231.3921	221.6	-9.7921
三孔至二孔	244.2778	226	-18.2778	282.7392	211.4	-71.3392
二孔至一孔	351.0227	347.6	-3.4227	313.3053	355.4	42.0947

表 7-4 复原骨笛 M282:20 和原件堵小七孔音程比较

2. M282:20 骨笛开小七孔时的测音

摘自附录三中数据表格，M282:20 号骨笛测音开小七孔统计数据，列举如下（单位：音分）。

孔数	堵小七孔（上行）音高		相邻音程	堵小七孔（下行）音高		相邻音程
筒音	873.6548	#F5-26		877.8661	#F5-22	
			179.6987			177.8769
七孔	1053.354	#G5-46		1055.743	#G5-43	
			170.8346			195.3186
六孔	1224.188	A5+25		1251.062	#A5-48	
			173.795			170.1698
五孔	1397.983	B5-1		1421.231	B5+22	
			206.7509			198.5677
四孔	1604.734	#C6+6		1619.799	#C6+21	
			169.0435			219.1397
三孔	1773.777	#D6-25		1838.939	#D6+40	
			334.2619			264.9623
二孔	2108.039	F6+9		2103.901	F6+5	
			337.5694			329.4651
一孔	2445.609	#G6+46		2433.366	#G6+33	

表 7-5 复原骨笛 M282:20 开小七孔测音数据统计分析

根据《舞阳贾湖》考古报告中测音数据，M282:20 号骨笛开小七孔测音数据共 3 组，加上黄翔鹏在《舞阳贾湖骨笛的测音研究》一文中公布的 3 组开小七孔测音数据，总计 6 组。数据列举如下，并进行适当统计分析。单位：音分

	孔数	1	2	3	4	5	6	平均值	音名	相邻音程
开小七孔（上行）	筒音	944	870	1028	908	940	934	937.3333	#F5+37	
										261.8333
	七孔	1208	1180	1209	1189	1210	1199	1199.167	A5-1	
										160.5
	六孔	1375	1349	1351	1357	1367	1359	1359.667	B5-40	
										144.5
	五孔	1524	1515	1488	1484	1510	1504	1504.167	C6+4	
										160
	四孔	1716	1699	1501	1668	1710	1691	1664.167	D6-36	
										234.8333
	三孔	1916	1922	1896	1868	1901	1891	1899	E6-1	
										244.6667
	二孔	2160	2164	2155	2104	2139	2140	2143.667	#F6+44	
										270
	一孔	2357	2385	2436	2425	2439	2440	2413.667	A6+14	
开小七孔（下行）	筒音	952	929	932	913	935	937	933	#F5+33	
										266.8333
	七孔	1213	1190	1200	1191	1205	1200	1199.833	A5-1	
										157.3333
	六孔	1361	1343	1360	1352	1367	1360	1357.167	B5-43	
										148.1667
	五孔	1522	1500	1505	1495	1508	1502	1505.333	C6+5	
										197.8333
	四孔	1714	1699	1692	1695	1717	1702	1703.167	D6+3	
										198.8333
	三孔	1921	1900	1875	1895	1915	1906	1902	E6+2	
										235.1667
	二孔	2150	2137	2126	2125	2145	2140	2137.167	#F6+37	
										264.8333
	一孔	2357	2337	2414	2425	2439	2440	2402	A6+2	

表 7-6 骨笛 M282:20 开小七孔测音数据统计分析

分析：对比以上两表，不难发现在开小七孔情况下，复原骨笛和原件骨笛所有音孔在绝对音高上也有较大差异，与堵小七孔时的情况基本相似。上行相差最大为 145 音分，最小也有 31 音分；下行相差最大 144 音分，最小 31 音分。

	复原品（上行）	原件（上行）	差异	复原品（下行）	原件（下行）	差异
筒音	873.6548	937.3333	63.6785	877.8661	933	55.1339
七孔	1053.354	1199.167	145.813	1055.743	1199.833	144.09
六孔	1224.188	1359.667	135.479	1251.062	1357.167	106.105
五孔	1397.983	1504.167	106.184	1421.231	1505.333	84.102
四孔	1604.734	1664.167	59.433	1619.799	1703.167	83.368
三孔	1773.777	1899	125.223	1838.939	1902	63.061
二孔	2108.039	2143.667	35.628	2103.901	2137.167	33.266
一孔	2445.609	2413.667	-31.942	2433.366	2402	-31.366

表 7-7 复原骨笛 M282:20 和原件开小七孔时绝对音高比较

分析：在开小七孔情况下，复原骨笛和原件骨笛之间音程关系上与堵小七孔时相比，有所不同。上行差异较大，最大差异出现三孔至二孔音程达到 90 音分。下行差异略小，最小差异仅 0.73。虽然筒音至七孔和二孔至一孔音程差异达到 89 音分，但超过 60 音分的差异仅出现了两次，较上行少。

	复原品（上行）	原件（上行）	差异	复原品（下行）	原件（下行）	差异
筒音至七孔	179.6987	261.8333	82.1346	177.8769	266.8333	88.9564
七孔至六孔	170.8346	160.5	-10.3346	195.3186	157.3333	-37.9853
六孔至五孔	173.795	144.5	-29.295	170.1698	148.1667	-22.0031
五孔至四孔	206.7509	160	-46.7509	198.5677	197.8333	-0.7344
四孔至三孔	169.0435	234.8333	65.7898	219.1397	198.8333	-20.3064
三孔至二孔	334.2619	244.6667	-89.5952	264.9623	235.1667	-29.7956
二孔至一孔	337.5694	270	-67.5694	329.4651	264.8333	-64.6318

表 7-8 复原骨笛 M282:20 和原件开小七孔时音程比较

3. M282:20 骨笛测音分析小结

由上可见，M282:20 号骨笛复原品测音总体音高较原件的测音数据低，差异达到 80-100 音分。而两者音程关系差异较小，平均差异未超过 50 音分，偶见最大差异达到 90 音分。虽然差异较大，但由于边棱音管乐器测音受多项人为因素的影响，笔者认为骨笛复原品的音程关系和原件测音结果之间存在一定的相关性。

对于复原品总体音高偏低的情况，笔者分析有如下几个可能的原因造成。

首先是测音者吹奏方式和习惯。据《舞阳贾湖》第九章《骨笛研究》执笔人

肖兴华介绍，对原件骨笛的测音是采用竖吹演奏加以采集。仔细分析可以发现，竖吹法和斜吹法两种吹奏方法，由于吹嘴和管口之间距离的不同，可能导致吹口校正的不同。竖吹由于嘴与管口的距离较近，吹口校正量较小，则理论振动管长较短，音略高。而斜吹，嘴和管边棱距离较远，校正量偏低，所以音略低。不仅如此，即使是相同的演奏法，不同测音人员有不同个人演奏习惯，每次的吹奏音高也不尽相同。黄翔鹏《舞阳贾湖骨笛的测音研究》一文中也是采用竖吹法，比较不同组上下行测音数据，可以发现并非每组数据的总体音高可以达到完全一致，差异最大时也近 100 音分左右。

第二，骨笛复原品的制作主要依据《舞阳贾湖》考古报告中所公布的骨笛尺寸，这些数据准确性，直接影响骨笛复原的准确性。作为正式考古报告，公布数据的真实性和权威性不容置疑。但仅在第九章《骨笛研究》图三六四.3 中，笔者也发现了一些明显的错误。如 M282:20 号骨笛公布线描图中，全长最长处为 22.7 cm，最短处为 22.4 cm。而将所有孔据相加之后却得出全长最短为 22.51 cm，出现 0.11 cm 误差。笔者慎重起见，按照 22.51cm 进行加工，以便日后发现有错，进行二次加工。这样一来管长就有可能比原件尺寸略长。这很可能是导致复原品总体音高偏低的原因。

二、M253:4 号骨笛复原品与原件测音的比较

摘录附录三中数据表格，M253:4 号骨笛测音统计数据，列举如下（单位：音分）

孔数	堵小七孔（上行）音高		相邻音程	堵小七孔（下行）音高		相邻音程
筒音	849.2464334	F5+49		833.7385964	F5+34	
			333.4665			296.6984
八孔	1182.712908	A5-18		1130.437043	#G5+31	
			166.5438			153.4303
七孔	1349.25669	#A5+49		1283.867298	#A5-16	
			110.3478			172.5733
六孔	1459.604469	C6-41		1456.440643	C6-43	
			143.8574			121.7221
五孔	1603.461863	#C6+3		1578.162721	#C6-21	
			142.3385			168.403
四孔	1745.800376	D6+45		1746.56572	D6+47	
			154.7329			155.2578
三孔	1900.533241	E6-1		1901.823501	E6+2	
			187.2252			183.0659
二孔	2087.758447	#F6-14		2084.889432	#F6-15	
			203.8991			221.1419
一孔	2291.657504	#G6-10		2306.031306	#G6+6	

表 7-9 复原骨笛 M253:4 测音数据统计分析

根据《舞阳贾湖》考古报告中测音数据，M253:4 号骨笛测音数据共 2 组。数据列举如下，并进行适当统计分析。单位：音分

	孔数	1	2	平均值	音名	相邻音程
M253:4 骨笛 上行	筒音	905	895	900	#F5	
						285
	八孔	1180	1190	1185	A5-15	
						155
	七孔	1335	1345	1340	#A5+40	
						122
	六孔	1450	1474	1462	C6-38	
						119
	五孔	1567	1595	1581	#C6-19	
						122.5
	四孔	1692	1715	1703.5	D6+4	
						140.5
	三孔	1838	1850	1844	#D6+44	
						173.5
	二孔	2015	2020	2017.5	F6+18	
						197.5
	一孔	2215	2215	2215	G6+15	
M253:4 骨笛 下行	筒音	910	915	912.5	#F5+13	
						277.5
	八孔	1180	1200	1190	A5-10	
						138.5
	七孔	1322	1335	1328.5	#A5+29	
						129
	六孔	1455	1460	1457.5	C6-42	
						108.5
	五孔	1572	1560	1566	#C6-34	
						136
	四孔	1712	1692	1702	D6+2	
						139
	三孔	1847	1835	1841	#D6+41	
						185
	二孔	2030	2022	2026	F6+26	
						181.5
	一孔	2215	2200	2207.5	G6+7	

表 7-10 骨笛 M253:4 测音数据统计分析

分析：对比以上两表，M253:4 号复原骨笛和原件骨笛所有音孔在音高上有较大差异。呈现低音区偏低，高音区偏高的情况。最大差异出现在下行时的一孔，为 99 音分。但总体差异较小。

	复原品（上行）	原件（上行）	差异	复原品（下行）	原件（下行）	差异
筒音	849.2464	900	50.75357	833.7386	912.5	78.7614
八孔	1182.713	1185	2.287092	1130.437	1190	59.56296
七孔	1349.257	1340	-9.25669	1283.867	1328.5	44.6327
六孔	1459.604	1462	2.395531	1456.441	1457.5	1.059357
五孔	1603.462	1581	-22.4619	1578.163	1566	-12.1627
四孔	1745.8	1703.5	-42.3004	1746.566	1702	-44.5657
三孔	1900.533	1844	-56.5332	1901.824	1841	-60.8235
二孔	2087.758	2017.5	-70.2584	2084.889	2026	-58.8894
一孔	2291.658	2215	-76.6575	2306.031	2207.5	-98.5313

表 7-11 复原骨笛 M253:4 和原件绝对音高对比

分析：复原骨笛的相邻音程和原件骨笛的相邻音程之间关系差异也不大。上行最大差异出现在筒音至八孔音程，比原件高出 48 音分。下行差异略小，最大差异出现在七孔至六孔，比原件高出 45 音分。其他各音程差异基本低于 24 音分。

	复原品（上行）	原件（上行）	差异	复原品（下行）	原件（下行）	差异
筒音至八孔	333.4665	285	-48.4665	296.6984	277.5	-19.1984
七孔至八孔	166.5438	155	-11.5438	153.4303	138.5	-14.9303
七孔至六孔	110.3478	122	11.6522	172.5733	129	-43.5733
六孔至五孔	143.8574	119	-24.8574	121.7221	108.5	-13.2221
五孔至四孔	142.3385	122.5	-19.8385	168.403	136	-32.403
四孔至三孔	154.7329	140.5	-14.2329	155.2578	139	-16.2578
三孔至二孔	187.2252	173.5	-13.7252	183.0659	185	1.9341
二孔至一孔	203.8991	197.5	-6.3991	221.1419	181.5	-39.6419

表 7-12 复原骨笛 M253:4 和原件音程对比

小结：从以上图表分析来看，M253:4 号骨笛复原品测音音高和原件测音数据，总体上来说在中音区较为符合，而高低音区出现较大偏离。就骨笛孔与孔之间相邻音程关系来看，对骨笛复原品的音程测定基本符合原件音程测定。

M253:4 骨笛复原品在高低音区产生差异原因，笔者分析认为，应和《舞阳贾湖》所公布数据的不准确性有一定关系。从《舞阳贾湖》中《骨笛研究》一章中图三六五.2 可以看到 M253:4 号骨笛全长最长处为 22.7 cm，最短处为 22.3 cm。用 22.3 分别减去前八孔的长度，得到最后一段，即八孔到管末端距离应为 6.2cm。而图中给出的尺寸为 6.8cm，相差 0.6cm。笔者难以判断是属于印刷错误还是测量时误差，最终仍以 22.3cm 的长度进行加工，将八孔到末端的长度修正为 6.2cm。

当然人为演奏方法和习惯对骨笛复原品音高的影响必须予以考虑。前面已有提及，在此不再赘述。

第二节 复原骨笛动态测音结果分析

笔者依照《Nature》网站发表 M282:20 号骨笛演奏《小白菜》录音（JUZHONG ZHANG，1999），用 M282:20 号骨笛复制品吹奏河南名歌《小白菜》旋律，并将其与《Nature》网站上的录音进行对比。从而分析复原骨笛在音乐中所表现出来的音响属性。



图 7-1：《Nature》网上公布《小白菜》Flute7.wav 文件的波形图

对该曲各音测量的统计数据

唱名	频率	音分数	音名
5	1800.05	2438.953	A6+39
3	1514.3	2139.69	#F6+40
2	1318.75	1900.314	E6
1	1170.867	1694.401	D6-6
6	961.1925	1352.786	B5-48
5	877.245	1194.571	A5-6

表 7-13 《Nature》网公布《小白菜》动态测音分析

笔者自己参照 Flute7.wav 中曲调，用 M282:20 骨笛复原品吹奏。波形如下：



图 7-2： M282:20 号骨笛复原品录制《小白菜》小白菜 1.wav 的波形

对该曲各音测量的统计数据

唱名	频率	音分数	音名	指法
5	1728.433	2368.667	A6-31	○○○○○○°○
3	1413.98	2021.023	F6+21	●○○○○○°○
2	1227.35	1775.965	#D6-24	●●○○○○°○
1	1080	1554.547	#C6-45	●●●○○○°○
6	902.77	1244.226	A5+44	●●●●○○°○
5	795.405	1025.023	G5+25	●●●●●○°○

表 7-14 复原骨笛录制《小白菜》动态测音分析及指法

对比两组动态测音结果，可以发现吹奏骨笛复原品所测得《小白菜》音高普遍偏低。最大偏差达到 169 音分，出现在六孔上。偏低情况和静态测音的结果基本吻合。

从音程关系来看，二者差异略小，最大差异达到 61 音分。

音名	原件动态测音		复原品动态测音		差异
5	2438.953		2368.667		
		299.2631		347.6438	48.38077
3	2139.69		2021.023		
		239.3759		245.058	5.682051
2	1900.314		1775.965		
		205.9131		221.4184	15.50533
1	1694.401		1554.547		
		341.6153		310.3211	-31.2943
6	1352.786		1244.226		
		158.2147		219.2026	60.98792
5	1194.571		1025.023		

表 7-15 复原骨笛和原件 M282:20 动态测音比较

可见，复原骨笛和原件在动态测音结果中相差比较大。相比静态测音的情况要复杂得多。笔者认为这一情况和前面提过的主观音高感觉对乐器演奏影响有密切关系。演奏过管乐器的人都知道，虽然管乐器由于其固定的音孔而一直被认为是定音乐器，但在某音位上却大多可以通过气息、口风的调节，控制音高在一定范围内游移。演奏者在吹奏中会应其自身音高感觉不自觉地控制乐器的发声，以符合预期的音高序列。骨笛因结构简单，没有任何其它控制机构，所以人为自由度更高。

另外，以往骨笛动态演奏所采用的采录设备为金属盒带，设备因素对动态测音结果的影响较大。由于金属带播放机转速受很多因素，如电压、转子松紧度等

的影响，录有骨笛演奏音响金属带在重放时，可能出现转速偏移的问题，而导致音偏高或偏低的情况出现。所以不排除《Nature》网站上发表的音响文件，在转录中出现偏差的可能性。

第三节 复原骨笛频谱分析

以下采用通用音乐分析软件[44]对复原骨笛动态录音进行频谱分析。其中M282:20骨笛演奏笔者采用斜吹法演奏。

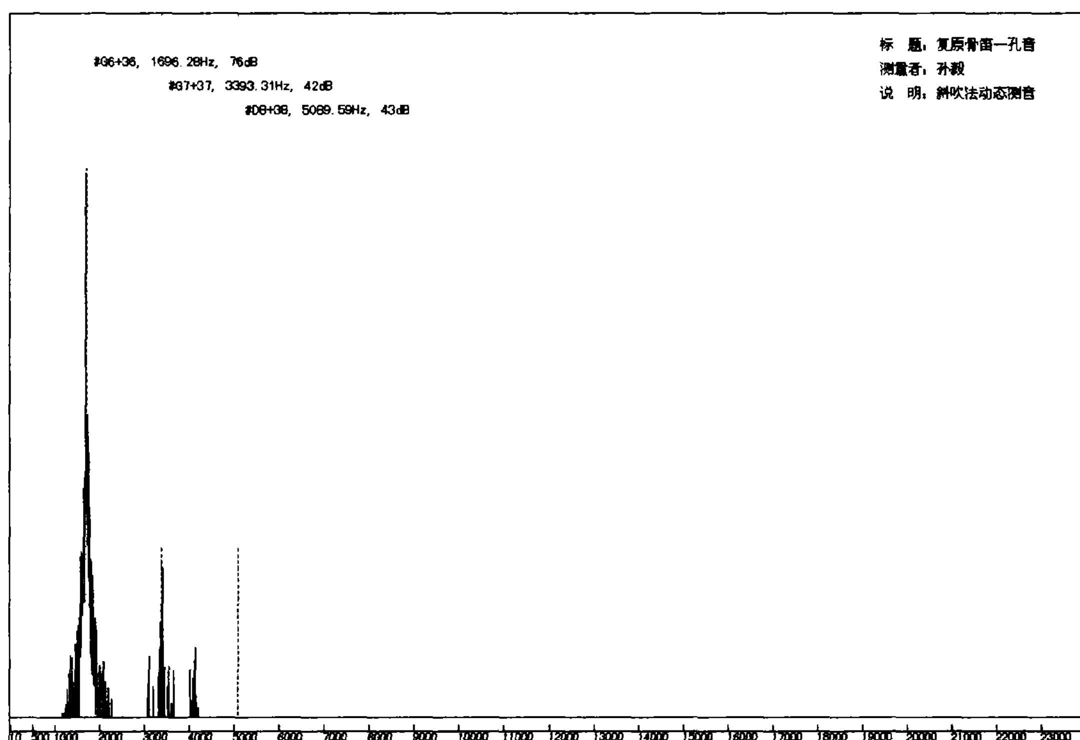


图 7-3：M282:20 复原骨笛一孔频谱

[44]韩宝强等开发 GMAS(General Musical Analysis System)

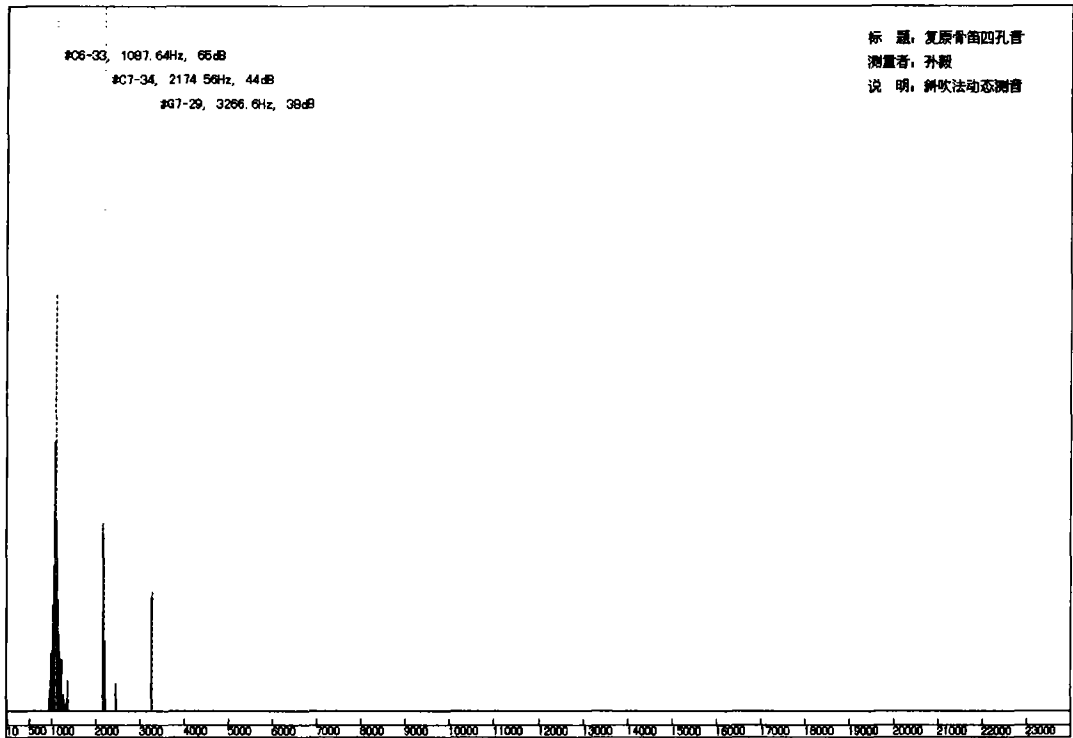


图 7-4：M282:20 复原骨笛四孔频谱

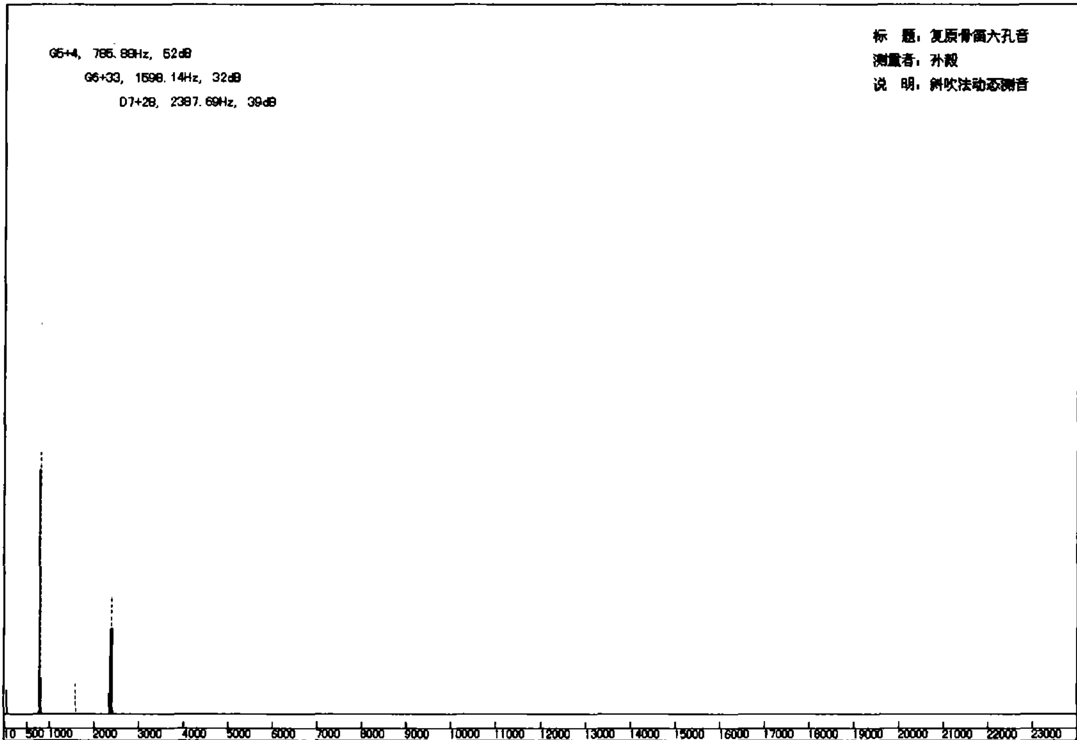


图 7-5：M282:20 复原骨笛六孔频谱

分析：由以上频谱分析图，可以看出复原骨笛在高低音区频谱基本相似，都有明显的一、二次泛音出现。

中国艺术研究院音乐研究所所藏M282:20骨笛演奏录音的频谱分析。

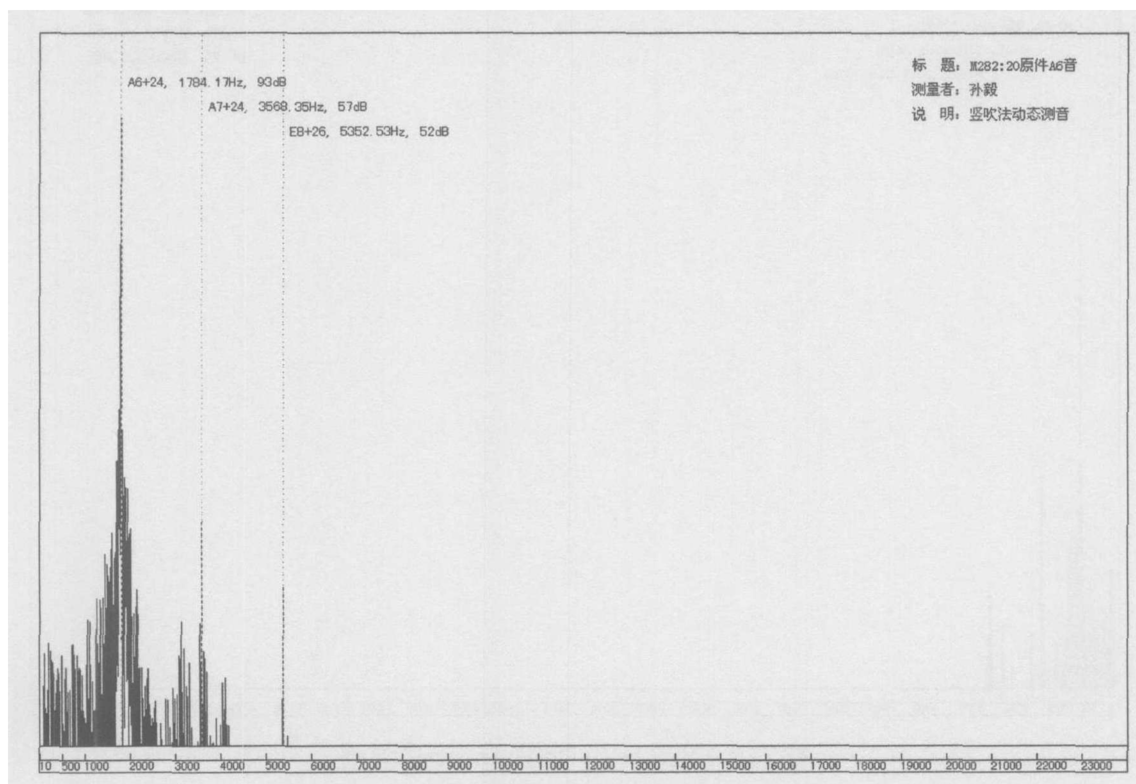


图 7-6：M282:20 骨笛 A6 音位频谱

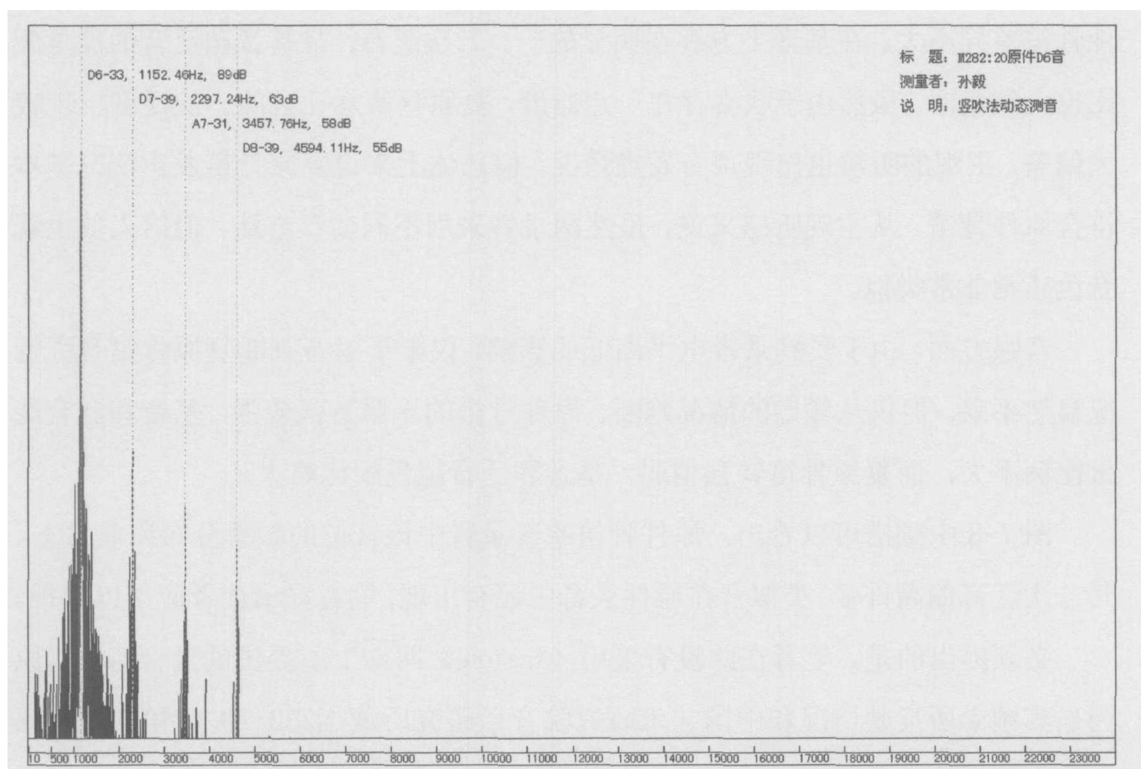


图 7-7：M282:20 骨笛 D6 音位频谱

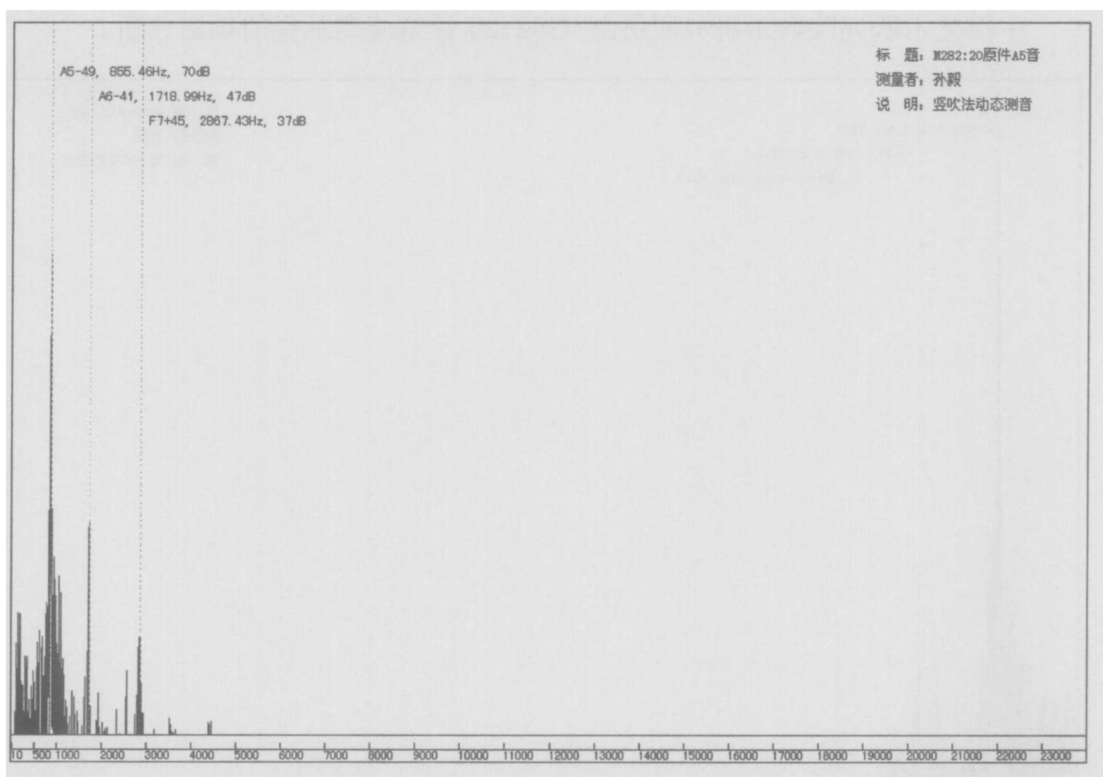


图 7-8：M282:20 骨笛 A5 音位频谱

分析：对比以上各两组测音频谱，可以发现复原骨笛在各音位上的频谱和原件骨笛差异不大。在基音上方存在明显的一、二次泛音，且基音和泛音的能量配比也大致相同。虽然由于吹奏存在一定难度，复原骨笛六孔音的一次泛音出现较大偏差，主观的听辨也出现声音发虚情况。但总体上来说复原骨笛发声情况基本符合原件骨笛。从主观听感来说，虽然两录音采用不同演奏方法，但给人的主观音色感觉非常类似。

音强方面，由于受到录音电平高低的影响，仅限于录音判断复原骨笛音强情况显然不妥。但仅从频谱的情况判断，原件骨笛的乐器音强较强，基音和泛音能量比例不大，而复原骨笛音强稍弱，基音和泛音能量配比略大。

图 7-8 中频谱可以看出，原件骨笛吹奏录音中该音位的频率分布属非常态，其二次泛音偏高许多。类似音在原件录音中还有出现，笔者提示读者应予以重视。

必须提出的是，笔者在此没有采用《Nature》网站上所提供的录音资料，原因是其频谱所反映情况和中国艺术研究院音乐研究所藏 M282:20 骨笛的录音出入较大。

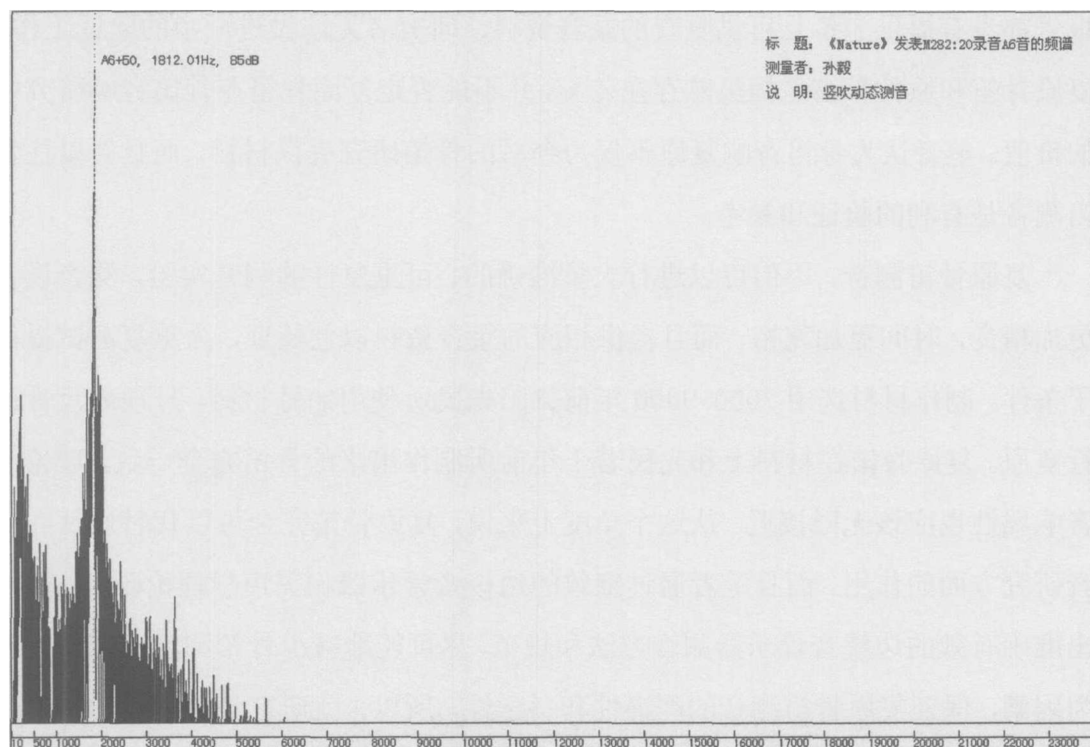


图 7-9：《Nature》发表 M282:20 录音 A6 音的频谱

将上图与前面 M282:20 录音资料的频谱相对照，《Nature》网站发表的录音资料明显存在非常大本底噪声，不仅如此，基音上方的一、二次泛音非常不明显。由于录音发表之前国内仍广泛使用盒式录音带进行音乐录音，而国内翻录设备参差不齐。鉴于这些情况，笔者判断差异产生原因应该是录音在被多次翻录后，产生严重的信号衰减、失真。

第四节 贾湖骨笛相关问题讨论

一、复原骨笛的科学价值

复原骨笛目的在于通过逼真复制骨笛来获取更多骨笛音响信息。笔者认为就目前文献所提供骨笛信息来看，复原骨笛在物理尺寸上已达到逼真复制骨笛的要求。复原品和原件的测音数据之间，虽然仍存在一定差异。但其相邻音程关系和原件已具有相当近似度。

骨笛原件测音由于当时设备、时间、人员等方面原因，没有条件进行大量测音实验，测音数据的准确性、科学性也无法保证。而且以往所有考古报告和测音

报告都没有提供完备且可供复查的录音资料，研究者无法做进一步的验证工作。复原骨笛和原件骨笛之间虽然存在差异，并不能否定复原骨笛在骨笛音响研究中的价值。笔者认为骨笛音响复原不仅为今后的骨笛研究提供材料，而且对以往骨笛测音是有利的验证和参考。

复原骨笛测音，不但可以进行大量准确的、可重复性的测音实验，测音设备更加精良，时间更加充裕，而且提供相应的录音资料以便验证，为重复测试提供了条件。制作材料选用7000-9000年前舞阳先民所使用的骨材料，丹顶鹤尺骨进行复原。复原骨笛在材料上和先民若干年前所制作出来的骨笛完全一致，理论上音响属性也应该无限接近。从这个角度上来说，复原骨笛完全可以代替原件在测音研究方面的作用。而且笔者通过细致的边棱音管乐器相关声学理论研究，总结出准确有效的边棱音管乐器测音方法和规范，尽可能地减少骨笛测量过程中的人为因素，保证复原骨笛测音的严谨性和科学性。所以，就研究骨笛时代的音乐形态情况而言，复原骨笛比原件更具操作性、准确性和真实性，因而具有骨笛原件无法替代的科学价值。

复原骨笛和原件差异产生有多方面原因。边棱音测音过程中人为因素的影响是测音出现差异的主要原因，这一点在前面的论述中已经多次强调过。

另外值得注意的是，复原骨笛所采用尺寸数据均来自前人的测量，测量中就难免出现误差和错误。任何测量都存在误差，骨笛音响复原无论制作还是测量都必然存在误差。对于误差只能避免，不可能完全消除。但《舞阳贾湖》中公布骨笛尺寸数据的明显错误，并不是误差所至。可能是印刷错误、也有可能另有原因。在原件无法进行再次测量的情况下，笔者无从考证其原因，只能用适当方法加以修正，所以复原品必然和原件有所差异。尺寸上有差异会直接反映到音响属性，所以原件和复原品之间的音高差异也就不难解释。总结复原骨笛的经验，原始物理尺寸数据是复原的关键问题。只有精确数据才能为复原骨笛提供精确的指导。所以笔者认为，骨笛物理测量精度尚有待进一步提高。

二、骨笛音律问题讨论

骨笛出土之后，随着测音数据的公布，许多研究者对骨笛的音律问题进行论述。近些年，《舞阳贾湖》考古报告正式出版后，有关学者对于骨笛的音阶、律

制等问题的争论也越来越多。从骨笛音响复原和实际测音情况来看，笔者认为就目前骨笛相关研究水平，讨论骨笛音律问题还为时尚早。

缪天瑞《律学》对律有这样定义，“律是构成律制的基本单位；而律制是各律在高度上的精密规定而形成的体系。”“音律”的解释则是，“音律除指二字原义的复合涵义或律制外，亦指与律学、乐学相关的音乐理论，又称‘乐律’。”[45]从以上两个定义不难发现，无论是“律”还是“音律”都是人为规定的音高标准，是度量音高的准则。

律是人为规定的音高标准，是度量音高的准则。律从众多音乐实践中抽象出来，一般以振动体长度、正律器、乐器定弦法、开孔规律或是数理逻辑形式继承下来。也就是说乐器的定弦、定音、开孔等诸多问题都是按一定律规定进行。

乐器测音工作中所测得的音是用物理方法以频率为度量单位而产生，是对乐器音高的客观反映。测定的音高数据可以在判断固定律的过程中，起到辅助的作用。单凭音高客观数据测定，笔者认为不足以准确地判断律的情况。

首先，正如实际音乐进行中节拍不可能完全精准地符合节奏的要求，音高和律高之间有着准确性和变通性的辩证统一。《乐问》中黄翔鹏这样说：“客观的音乐实践史各种律制的矛盾统一全世界带普遍性的三种律制（五度相生、纯律、平均律）在音乐中是混用、并用的……规模大一点、技术上复杂一点的乐曲是不大可能从头到尾单用一种律制的”[46]。现代的测量手段可以让我们实时的了解演奏者和演唱者所演奏、演唱的音。把这些音和律制相比较，不难发现其中有很多“不纯”、“不准”的情况。在认识音高和律高的辩证关系的问题上，黄翔鹏认为其“正好反映了客观世界的丰富多彩”，“音乐是艺术，不是技术。人们宁愿听多少混杂了不纯的音响的音乐。”所以从测音结果到确定律制的过程中，不可避免要遇到“不准”、“不纯”的音。

第二，客观的测量必然产生误差。测音误差的产生有很多原因，主要有测量设备误差、测量方法错误以及人为取样偏差。如仅以个别测音数据来判断乐器律的情况，显然不够准确。从复原骨笛的测音结果中也可以看出，由于边棱音管乐器吹奏方法、口风、气息的影响，骨笛在特定音孔的测音前后差异较大，最大可以达到 100 多音分（夏季，2003）。如此大的音高漂移的情况下，要通过音响总

[45]缪天瑞 《律学》第三次修订版 人民音乐出版社 1999 年 12 月
[46]黄翔鹏 《乐问》中央音乐学院学报社 2000 年 6 月

结出其律的情况显然不大可能。

第三，目前所知各律制间音高关系差距较小，且律制间常有共用音程关系的现象。如十二平均律、五度相生、纯律三种律制间差距最大不过 24 音分，且五度律和纯律就共用纯五度、纯四度、大二度音程。

再有，对于律这样兼顾主观感觉和客观音响的标准问题，单从客观测量数据的角度分析并不充分。从前面对律的定义可知，律的规定是人主观听觉对客观音响刺激的选择。同时它又以规定客观音响刺激影响着人的主观听觉。所以律绝对不是简单的客观音高问题，而是与听觉主体的人有密切关系的。

所以，简单测音工作的结果并不能代表律的情况，而且测音工作仅是律确定过程中的一部分，还需要进行其他大量的工作才可以完成。其中包括规范、广泛地测量、认真分析和选取乐器音高的特征音程。另外还需结合人耳主观听觉感觉、乐器制作和工艺以及乐律学史的研究成果共同加以分析。

根据以上分析，无论是根据以往骨笛测音的结果还是复原骨笛测音结果都不足以确定骨笛的音律问题。至今骨笛出土数量虽然众多，《舞阳贾湖》公布为 25 支。但实际进行音高测量不过 6 支，数量上就非常缺乏。而现有 6 支骨笛的测音数据中，亦存在不准确、不规范测音过程，测量数据科学性和准确性难以保证。目前笔者由于复原骨笛，由于骨材料有限，仅制作两支骨笛。在数量如此少的情况下即使加以总结，也需今后大量骨笛复原进一步验证和实践。

即使经过科学严谨的，符合骨笛声学特性的测音过程，得出准确无误的测音结果，也只是完成了骨笛定律问题的第一步。还需要总结出骨笛制作、开孔的普遍规律，并结合其他相关信息，加以综合分析。才有可能探寻贾湖骨笛的音律。

三、M282:20 号小七孔的由来

M282:20 小七孔，在骨笛研究中最富争议的问题。其中主要的两个观点：其一先开小七孔，开之过高，调整后开大七孔；其二先开大七孔，失之过低，开小七孔调音。长期从事舞阳贾湖骨笛的肖兴华同意前者，而黄翔鹏等学者倾向于后者。2003 年夏季发表论文《中国原始音乐声学成就数理分析——贾湖骨笛研究》中对小七孔的比较分析，最后结论也倾向于后者。

在尺骨和胫骨都存在骨端和骨之间连接纵脊贯穿骨壁的天然小孔。这个小孔

在大部分鸟类骨骼上都天然存在。

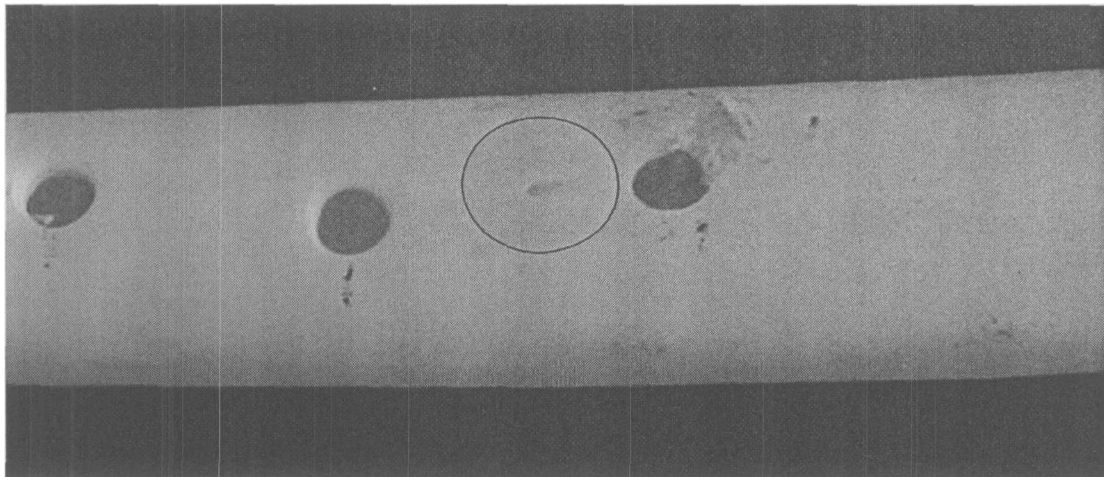


图 7-10 丹顶鹤尺骨上的小孔

笔者同意小七孔调音功能的说法。同时认为天然小孔在骨笛上分布应该和先民发现 M282:20 小孔调音功能之间存在某种联系。

仔细观察《OLDEST PLAYABLE MUSICAL INSTRUMENT FOUND AT JIAHU EARLY NEOLITHIC SITE IN CHINA》上发表的图片，不难发现图中六支骨笛除 M78:1 骨笛和 M282:20 骨笛没有天然小孔外，其他都明显可见。

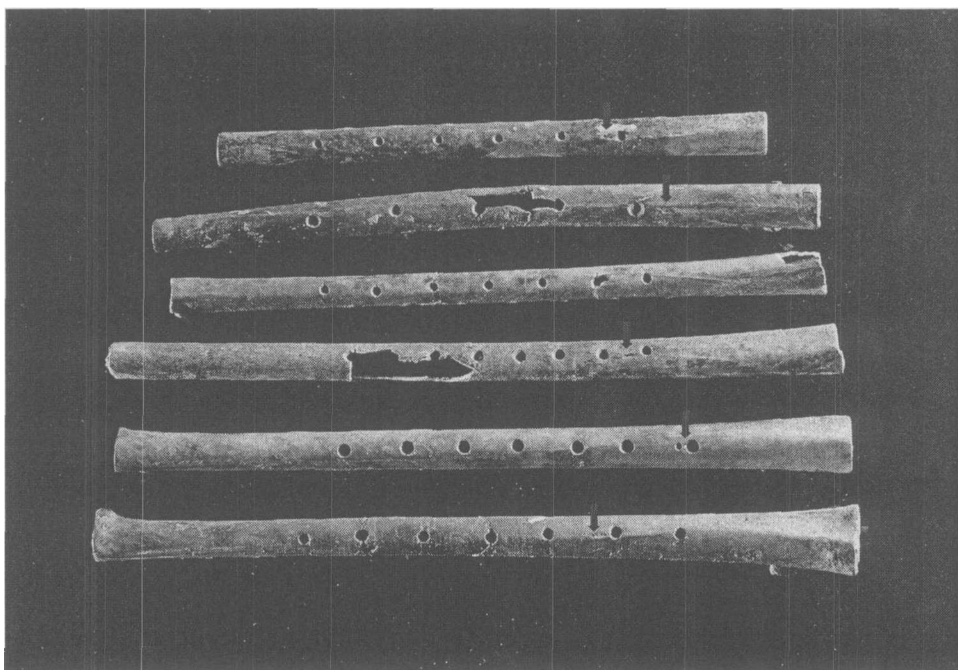


图 7-11 骨笛上的天然小孔位置

在有天然小孔的四支骨笛中，M341:1 和 M341:2 为早期的两支骨笛，M282:21 为中期骨笛，M253:4 号骨笛为晚期八孔骨笛。早期六孔骨笛 M341:2 上天然小孔

处于吹孔起第 6 孔前的位置，晚期 M253:4 的天然小孔处于吹口起第 8 孔前的位置。M341:1 为早期五孔骨笛，天然小孔处于吹口起第 5 孔后的位置。笔者认为仅从目前可以见到的这六支骨笛来看，似乎有这样的一个规律：即天然小孔总是处于骨笛最后一孔的附近，并辅于最后一孔前的位置。

五孔骨笛虽然不完全符合，但假设将五孔骨笛看成六孔骨笛前五孔的话，则天然小孔也正好处于六孔孔位前的位置。

这样仅 M282:21 天然小孔不符合前面提到的规律，天然小孔处于 5 孔和 6 孔之间。正如《舞阳贾湖》一书中所载“M282:21 号骨笛为墓主人生前已经折断，这支骨笛若不是墓主人祖先所传，也是墓主人在世时的骨笛精品，虽然折断而未弃，经过精心修理，在两处折断处的骨笛壁上钻了 14 个小孔，用细线进行缀合继续使用”。笔者认为像 M282:21 这样的骨笛精品，必然有其不同于一般骨笛之处，所以在某些特征上不同于其他骨笛也是正常的现象。

如果天然小孔出现规律成立的话，则 M282:20 号骨笛的小七孔调音功能就有模仿天然小孔位置的可能。仔细观察骨笛图片可以看出，在 M282:20 号骨笛的七孔前沿有一个凹陷部分，它很容易使人想起天然小孔的前沿形状。也就是说天然小孔的位置被七孔所占。先民开七孔后，发现音响并不理想，于是模仿天然小孔在其他骨笛上的位置，开小七孔进行调音。

综上所述，笔者认为古代先民并没有无视天然小孔的存在，而是将其纳入到骨笛制作的考虑之中。M282:20 小七孔调音的功能正是模仿天然小孔位置而出现的。当然以上只是基于目前所掌握材料进行的大胆猜测，由于笔者所可参考的资料有限，需要等待更多研究材料的补充和验证。

四、骨笛演奏方法的探索

舞阳贾湖骨笛发声方法，根据文献提供的信息，至今为止有两种方法，一为斜吹法，一为竖吹。两种发声方法都有相应的测音数据，但究竟应该用什么方法，仍是音乐理论界争论的焦点。

竖吹法是将管体竖直，以管端上部管壁为边棱，产生自然口风使其发声。早在 1989 年黄翔鹏就已经提出，“用鹰骨笛斜出 45° 角的方法竖吹”（黄翔鹏，1989）方法吹奏贾湖骨笛。由于当时测音过程中没有留下任何图像资料和录音资

料，我们对竖吹法的了解也就仅限于文字的描述。在此后的多次测音中，基本都采用竖吹法进行测音。《舞阳贾湖》考古报告中所公布的数据均为竖吹法获得。《Nature》网站发表骨笛演奏《小白菜》录音，所用的演奏方法也是竖吹法。

斜吹法是向一侧偏斜，以管端侧面管壁为边棱，产生边棱音效应使其发声的方法。贾湖骨笛最早由中央民族乐团的笛子演奏家宁保生用斜吹法进行试奏（萧兴华，2000）。其后，刘正国认为斜吹法应该是骨笛的主要演奏方式，并因演奏法将贾湖骨笛和河南“筹”乐器联系起来，并认为骨笛应该定名为“骨龠”（刘正国，1996）。夏季在其论文中对骨笛发声方法从音频测量的角度上加以验证，认为斜吹法才是骨笛的正确发声方法。（夏季，2003）

笔者在贾湖骨笛的音响复原研究中，通过亲身吹奏，对于骨笛的演奏方法有些不成熟的看法，在此提出以供讨论。

首先，要像箫等乐器那样，在骨笛上完全竖直吹奏非常困难。笔者从未采用此吹法获得正确的音响。不是哑声，就是无法激励耦合作用。分析原因可能是，骨笛孔径过小造成管壁边棱与口风处距离过小，难以到达边棱音起振要求。夏季在其论文中曾发表“对贾湖骨笛（仿）竖吹演奏场面及测音的照片”。但仅从正面演奏的图片中，笔者发现所谓竖吹也并不是完全竖直演奏，也是略向一侧偏斜，形成自然口风。由于笔者手头一直没有得到关于竖吹法的其他资料，所以在复原骨笛测音过程中没有采用以往测音中常用的竖吹法。

第二，斜吹法演奏可以获得非常好的骨笛音响。斜吹法发声简单，笔者音响复原的所有数据都采用斜吹法进行演奏采集。从录音和频谱的情况可见，斜吹法不仅可以得到较稳定的音高序列，而且音色优美、音量较大。但笔者也发现斜吹法在低音区容易出现一孔多音的情况。

第三，竖直略偏斜的吹法较完全竖直吹奏容易获得较好的音响。实际上这种略微偏斜的竖吹法和斜吹法非常近似，只是口风与边棱的距离有所改变。另外由于吹嘴和管口距离变化，竖直略偏斜的吹法吹口校正量比斜吹校正量自然要少，所以音会偏高。

总之，笔者认为斜吹法应该贾湖骨笛容易上手的演奏方法。笔者从未演奏过边棱音类管乐器，但在很短的时间内就可以使用斜吹法吹奏出贾湖骨笛的全部音列。所以，笔者猜想距我们 7000-9000 年前的先民，应该不会避简就繁，选择困

难的方法来演奏骨笛。

五、复原音响研究的缺憾

贾湖骨笛音响复原研究在骨笛诸多研究方向上已经取得初步的研究成果。同时应该正视的是，由于课题时间、人员以及经费的限制，骨笛复原音响研究还有许多问题没有充分展开。其中主要问题存在于测音数据的纵向和横向比较方面。

笔者在本研究中所采用的测音方法是顺序间断测音，和原件骨笛的顺序连续测音方法存在较大差异，测量结果出入较大。笔者本欲在现有基础上，按照原件骨笛的顺序连续测音方法对复原骨笛进行测量，再结合复原骨笛的机械嘴测音方法对顺序间断测音和顺序连续测音的结果进行一定的校正。这样就可以更清楚地分辨出不同测音方法在骨笛测音研究中的价值。但由于实验时间和实验设备等条件的限制，后两项测音没有进行，这不能不说是骨笛音响复原研究中的遗憾。

另外原件骨笛的多次测音工作都是由徐桃英、萧兴华两位吹奏，笔者也曾想请两位原先从事测音的同志对复原骨笛进行测音，以求音响复原工作的客观、全面。但由于二位时间安排、身体状况等方面不便，测音工作迟迟未能进行。

虽然由于自身学术能力和课题研究时间、人员等诸多原因，骨笛音响复原研究仍留有不少缺憾。但笔者认为骨笛音响复原研究已经为后续研究工作提供了非常扎实的物质和理论基础，留有的缺陷和遗憾正可以激励笔者和其他研究者进一步地将研究工作深入进行下去。

结语

通过对舞阳贾湖骨笛音响复原研究，结合复原骨笛的测音工作，笔者得出如下结论：

1. 采用真实鹤骨进行的骨笛复原工作取得阶段性的成果，复原的骨笛在精确的物理尺寸和相同的材质方面上已经达到逼真还原距今7000-9000年前骨笛的目的。从测音的情况来看，鹤骨复原出的骨笛在各项音响属性上非常近似原件，足以满足今后测音和研究的需要。
2. 通过对复原骨笛音响的录制，首次给出骨笛的音响录音。填补了以往测

音过程没有完备录音记录的空白。

3. 就目前骨笛研究水平来看，探讨骨笛的音阶和律制应该慎重。特别对于骨笛当时用律的真实状况，已有的测音工作尚不能给予充分的支持。
4. 骨笛主要演奏方法应该为斜吹，其他的吹奏方法虽然也可以采用，但对于今人尚且难度较大，古代先民的情况可想而知。
5. 制作骨笛的材料应该不仅限于丹顶鹤尺骨，大型鹤类的尺骨或胫骨亦有可能。且骨骼本身结构上的天然小孔和M282:20骨笛上特殊小孔的成因之间的联系，不容忽视。

参考文献

1. 萧兴华 《中国音乐文化文明九千年——试论河南舞阳贾湖骨笛的发掘及其意义》2000年3月 第一期
2. 河南省文物考古研究所《舞阳贾湖》 科学出版社 1999年
3. 黄翔鹏 《舞阳贾湖骨笛测音研究》,《文物》1989年第一期 （《音乐学文集》）
4. JUZHONG ZHANG、 GARMAN HARBOTTLEN、 CHANGSUI WANG、ZHAOCHEN KONG 《OLDEST PLAYABLE MUSICAL INSTRUMENT FOUND AT JIAHU EARLY NEOLITHIC SITE IN CHINA》,《Nature》, vol401 23 September 1999 www.nature.com
5. 河南省文物考古研究所《河南舞阳贾湖新石器时代遗址第二至第六次发掘简报》 《文物》1989年 第一期
6. 吴钊 《贾湖龟铃骨笛与中国音乐文明之源》《文物》1991年3期
7. 戴念祖 《中国、希腊和巴比伦：古代东西方的乐律传播问题》 《中国音乐学》 1993年第三期
8. 童忠良 《舞阳贾湖骨笛的音孔设计与宫调特点》 《中国音乐学》1992年第3期
9. 张居中 《八千年前七孔骨笛和甲骨契刻符号在河南舞阳出土》 《中国文物报》1987年12月11日
10. 张居中 《考古新发现——贾湖骨笛》 《音乐研究》1988年4期
11. 张居中 《舞阳贾湖遗址出土的龟甲和骨笛》 《华夏考古》1991年第2期
12. 张居中 《"中国第一笛"发掘认识经过》 《光明日报》1993年3月28日第六版
13. 刘正国《笛乎 筹乎 龠乎——为贾湖遗址出土的骨质斜吹乐管考名》《音乐研究》1996年6月 第三期
14. 陈其翔 《舞阳贾湖骨笛研究》 《音乐艺术》上海音乐学院学报 1999年04期
15. 《舞阳贾湖》河南省文物考古研究所编著 科学出版社 1999
16. 荣政 《舞阳骨笛吹奏方法初探——兼谈"筹"与舞阳骨的比较》 《黄钟》武汉音乐学院学报 2000年增刊
17. 王丽芬（洛阳市文物考古队）《贾湖出土骨笛及相关问题》 《考古与文物》2002 年 4期
18. 陈通、戴念祖 《贾湖骨笛的乐音估算》 《中国音乐学》2002年第4期
19. 郑祖襄 《关于贾湖骨笛测音数据及相关论证问题的讨论》 《中国音乐学》2003年03期
20. 夏季、徐飞、王昌燧 《新石器时期中国先民音乐调音技术水平的乐律数理分析——贾湖骨笛特殊小孔的调音功能与测音结果研究》 《音乐研究》2003年第1期
21. 徐飞、夏季、王昌燧 《贾湖骨笛音乐声学特性的新探索——最新出土的贾湖骨笛测音研究》 《音乐研究》2004年01期
22. 夏季 《中国原始音乐声学成就数理分析——贾湖骨笛研究》 中国科技大学硕士论文 2003年5月
23. 陈其射《河南舞阳贾湖骨笛音律分析》《天津音乐学院学报》2005年2期
24. 李寄萍《骨笛仿古实验及分析推测》《天津音乐学院学报》2005年2期
25. 郑祖襄《舞阳贾湖骨笛调高音阶再析》 《音乐研究》2004年4期
26. 徐荣坤 《析舞阳骨笛的调高和音阶》《天津音乐学院学报》2006年1期
27. Patricio la Cuadra,Tamara Smyth,Chris Chafe,Han Baoqiang 《WAVEGUIDE SIMULATION OF NEOLITHIC CHINESE FLUTES》 http://ccrma.stanford.edu/~tamara/

publications/flute_isma_01.ps

28. 孙海 《德国出土的“万年骨笛”》 《人民音乐》 2003 年第 10 期总 450 期
29. 中国大百科全书出版社编辑部《中国大百科全书?音乐舞蹈卷》中国大百科全书出版社 2004 年 9 月
30. 科学时报社《科技考古学：未来不再是“陪衬”》 科技时报 2006 年 1 月 6 日
31. 黄翔鹏 《曾侯乙钟磬铭文乐学体系初探》 《音乐研究》1981 年第 1 期
32. 项阳 《山西乐户研究》文物出版社 2001 年
33. 韩宝强 《音的历程—现代音乐声学导论》 中国文联出版社 2003 年 5 月
34. ANSYS10.0 有限元分析软件 www.ansys.com
35. George K.Batchelor《AN Introduction to Fluid Dynamics》 Cambridge University Press 2004.4.1
36. 裴国献《骨组织工程学研究现状及发展趋势》 中国创伤骨科杂志 1999 年 9 月第一卷第一期
37. 马逸清、李晓民 《丹顶鹤研究》上海科技教育出版社 2002 年 6 月
38. 马如璋等编著《功能材料学概论》冶金工业出版社 1999 年 9 月
39. Donald E.Hall《Musical Acoustics》 2nd ed. Brooks/Cole Publishing Company 1990
40. Thomas D.Rossing《The SCIENCE OF SOUND》 2nd ed. Addison-Wesley Publishing Company March 1990
41. Helmholtz 《On the Sensation of tone as a Physiological Basis for the Theory of Music》 4th.ed Tran. By A.J.Ellis，1954
42. Gregor Widholm《SILVER, GOLD, PLATINUM - AND THE SOUND OF THE FLUTE》 http://iwk.mdw.ac.at/Forschung/english/linortner/linortner_e.htm 2004.9.7
43. 韩宝强、刘一清、赵文娟 《曾侯乙编钟音高再测量兼及测音工作规范问题》中国音乐学 1999 年 3 月
44. 韩宝强等开发 GMAS(General Musical Analysis System)
45. 缪天瑞 《律学》第三次修订版 人民音乐出版社 1999 年 12 月
46. 黄翔鹏 《乐问》中央音乐学院学报社 2000 年 6 月

附录一 丹顶鹤骨骼样本的取得

2005年3月27日，经多方走访，笔者与中国科学院动物研究所徐延恭副研究员取得了联系。笔者在Email中向徐延恭同志说明意图后，徐先生推荐笔者和长期从事丹顶鹤人工饲养的原沈阳动物园鹤类养殖中心基地的张玲女士联系。4月9日当笔者和现任沈阳野生动物园兽医院技术顾问张玲电话联系的时候，恰逢一只丹顶鹤由于染病，无法医治而死亡。听到笔者需要采集丹顶鹤骨骼进行复原骨笛的研究，张女士告知笔者，以往对死亡丹顶鹤的遗骸都是将四肢骨截下，内脏掏除，然后将剩余骨架送标本馆制作标本，前肢、后肢和内脏等都采用深埋处理。张女士说，如果需要可以携带单位介绍信到沈阳自取，并答应为笔者将前肢骨冰冻保留。

4月11日笔者到达沈阳野生动物园，在兽医院见到了张玲女士和徐殿举院长。经过办理一定手续，张玲女士将在冰箱中冰冻了38个小时的丹顶鹤一对尺骨、一对桡骨和一对肱骨拿出来，并展示给笔者。这是尚未截断的，左右两侧的前肢骨。由于没有经过处理，骨骼上尚带有很多的鹤肉。与笔者临行前打印的舞阳贾湖骨笛照片和尺骨相对照，确定了尺骨和舞阳贾湖骨笛制作材料具有很高的相似度。笔者非常兴奋地将骨骼样本收好。

当笔者将舞阳贾湖骨笛的照片介绍给张玲和徐院长看时，张玲女士立刻发现仅从M78:1骨笛图片所显示的形状看，后肢骨的胫骨亦非常有可能是制作骨笛的材料。张玲女士解释说，由于丹顶鹤胫骨非常直，是丹顶鹤骨骼中最长的骨。而且胫骨在将骨髓掏空后，亦是和尺骨非常相近的骨管，作为乐器的可能性也是有的。笔者立刻询问死鹤的胫骨是否可以取得，但张玲女士告知鹤骨其他部分已经由垃圾车运至垃圾坑中深埋了，笔者遗憾的作罢。

另外张玲女士还提出，制作骨笛的尺骨可能会在骨管直径和长度上有所差异。因为鹤的骨骼受其营养状况、健康状况、遗传等诸多因素的影响，其中野生丹顶鹤和人工饲养丹顶鹤的骨骼差异较大。首先，野生丹顶鹤在自然条件下，食物来源广泛，自主选择食物的范围较大，所以营养状况、健康状况都较人工喂养的鹤要好。再有，野生丹顶鹤长期处于高强度的迁徙飞行，在自然选择中，不断强化其运动能力，从而促使其骨骼发育强劲。人工环境喂养的鹤活动较少，致使

骨骼发育弱于野生鹤个体。所以野生鹤一般较人工鹤骨骼要粗、要长。即使是人工养殖丹顶鹤也受个体差异的影响，骨骼不可能完全一致。

张玲还提到制作骨笛的尺骨亦并不一定出自丹顶鹤。由于同属鹤科的鹤较多，其中和丹顶鹤体型差异不大的鹤有黑颈鹤、白鹤、白枕鹤、白头鹤、赤颈鹤等。除赤颈鹤比丹顶鹤体型略大，黑颈鹤、白鹤、白枕鹤等虽较丹顶鹤体型为小，鹤类尺骨在尺寸上亦比丹顶鹤尺骨略小。但对比《舞阳贾湖》考古报告所提出的骨笛尺寸来看，亦可作为制作骨笛的材料（后面部分有详细论述）。就目前的分布区域来看，和丹顶鹤繁殖地和越冬地较为接近的有白鹤、白枕鹤以及白头鹤。所以采用这些鹤骨的可能性还是存在的。

最后张玲女士告知笔者，丹顶鹤的寿命较长，可以活 50 至 60 年的时间。除发生疾病或发情期相互争斗造成伤害外，一般情况下不易死亡。对于死鹤，如果患有传染病的遗骸，一般采用深埋处理。而意外死亡个体则送标本馆制作标本。其中制作标本的个体，前肢骨和后肢骨一般都截断，并以支架代替前肢骨和后肢骨。

笔者本预计当日即离开沈阳，返回北京，但考虑胫骨在制作骨笛中的可能性，笔者决定第二天再次前往沈阳野生动物园，希望得到胫骨的标本。第二天再次见到张玲女士，说明来意。张玲女士非常为难地告诉笔者，死亡丹顶鹤胫骨被截断，且上半部分连同骨架一起已经送标本室。幸好徐院长非常热心地回忆起一个月前死亡的另一只雌性丹顶鹤遗骸，尚在屋顶做风干处理。于是笔者跟随兽医院的一名兽医，在废弃的草料房屋顶上的露天风干场上，顺利得到了丹顶鹤的胫骨。

最后笔者带回北京的丹顶鹤骨骼有：

<table>
<tr><th>骨骼</th><th>数量（支）</th><th>所属丹顶鹤</th></tr>
<tr><td>尺骨</td><td>2</td><td rowspan="3">901-211 号丹顶鹤，染病死亡
死亡时间：2005 年 4 月 6 日
死亡地点：沈阳野生动物园兽医院
谱号：901-211
当地环号：97 15-7
名称：9715.010
孵化时间：1997 年 6 月 5 日
性别：雌性
父系谱号：901-33
母系谱号：901-27
经历、出生、育雏情况：孵出、饲养出生、人工喂养
出生地点：沈阳动物园</td></tr>
<tr><td>桡骨</td><td>2</td></tr>
<tr><td>肱骨</td><td>2</td></tr>
<tr><td>胫骨</td><td>2</td><td>901-284 号丹顶鹤，发情期争斗，意外喙死
死亡时间：2005 年 3 月 2 日
死亡地点：沈阳野生动物园兽医院
谱号：901-284
当地环号：99 15-3
名称：9915.016
孵化时间：1999 年 5 月 26 日
性别：雌性
父系谱号：901-33
母系谱号：901-27
经历、出生、育雏情况：孵出、饲养出生、人工喂养
出生地点：沈阳动物园</td></tr>
</table>

附录二 材质、管径、管长对骨笛发声的影响实验报告

一、实验目的

针对舞阳贾湖骨笛音响复原研究的需要，找出骨骼材料材料密度、弹性模量、表面粗糙度和管长、管径对骨笛各音响属性的影响程度。

二、实验设备和材料

不同密度 PPR 管材两支、两块圆柱形中碳钢（hp:200-220）密度为 7.8g/cm^3、计算机一台、通用乐器测量系统软件、拾音器。

三、实验过程

202mm 尺寸切割 PPR 管材。为了切割精度保证，笔者选择清华大学精密金属加工车间对两 PPR 协助进行切割。由于 PPR 管材为国家统一标准件（国家标准 GB/TI8742，现行标准 DIN 8078-1996），两管的外径和内径完全相同，分别为 20mm 和 14mm。两圆柱形中碳钢其中一支用金工车间车床加工圆柱体长为 202mm、外径至 20mm，用钻床加工内径为 14mm 钢管。由于管长过长，没有相应钻头，采用两端分别钻孔方法，偏心距小于 0.05mm。另一支同样方法加工为 202mm、外径 20mm、内径 12mm 钢管。这样得到四支管，分别是密度不同，物理尺寸、弹性模量相同的 PPR 管两支，密度、弹性模量相同，内径不同钢管两支。对这四支管在室温为 17° C、相对湿度 42%的自然声场环境下，按照舞阳贾湖骨笛的演奏方法，即斜吹，形成自然吹口的演奏并用拾音器采录进计算机，用通用乐器测量系统软件进行测音。

在测音中每支管实际吹奏并录制十组音响。在测音音响测量中，选择气声较少、音质明亮且饱满的进行测量。每支管选择音响六组进行测音。为了保证测音的客观性，考虑到管乐器发声的特点，音头和音尾不稳定且伴随有噪声，所以选取每个音的音腹部分作为测量样本。

在六组测音音响中选取其中声音最为饱满、音强最强的样本进行频谱分析

四、实验结果

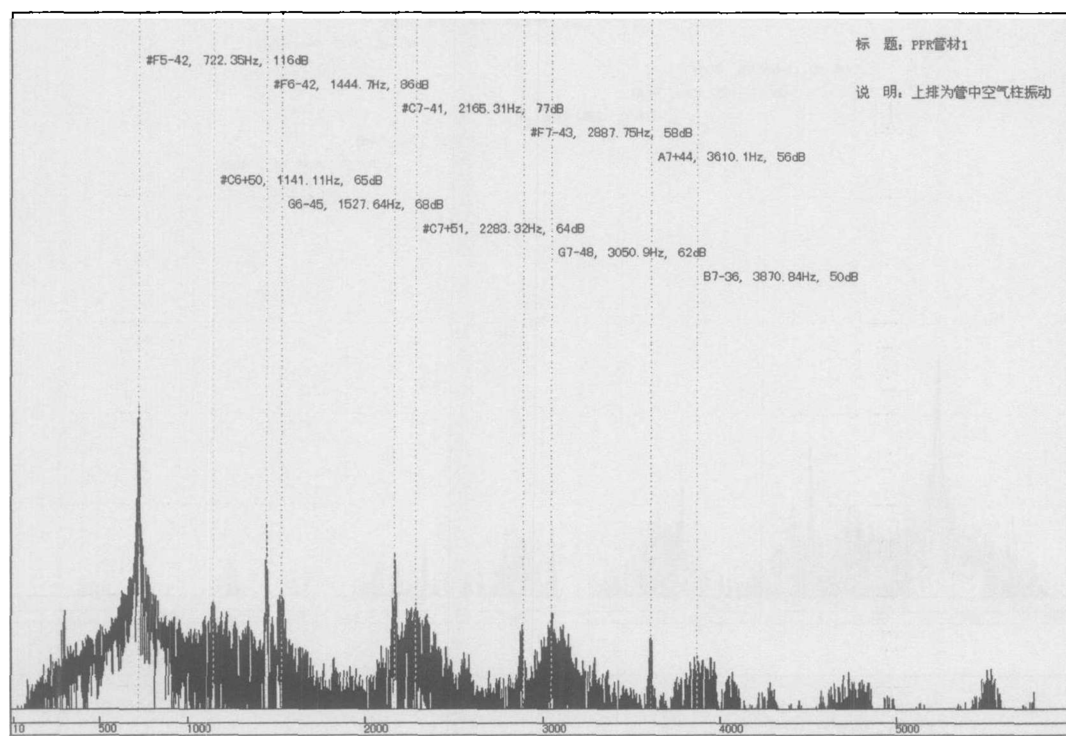
1、测音数据

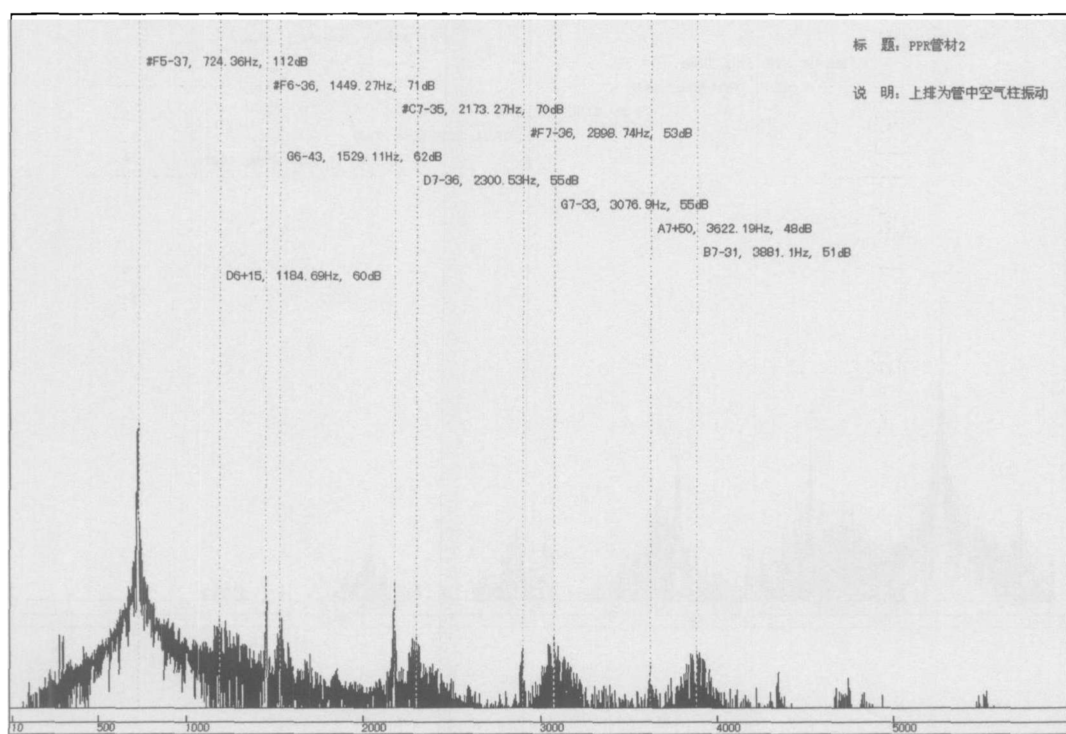
管材	测音数据	1	2	3	4	5	6	方差	数据平均	去偏平均
PPR1	采样频率	722.07	725.83	725.46	726.92	723.63	725.64	3.08491	724.925	725
	对应音名	#f2-42	#f2-33	#f2-34	#f2-31	#f2-39	#f2-34			#f2
PPR2	采样频率	724.36	736.99	726.92	726.01	723.63	723.08	26.8619	726.832	725
	对应音名	#f2-37	#f-7	#f2-31	#f2-33	#f2-39	#f2-40			#f2
钢管 1	采样频率	726.28	725	725.64	719.87	721.61	722.62	6.41626	723.503	723
	对应音名	#f2-32	#f2-35	#f2-34	#f2-48	#f2-44	#f2-41			#f2-
钢管 2（小口）	采样频率	729.58	727.11	728.94	727.66	728.21	726.37	1.39717	727.978	727.
	对应音名	#f2-25	#f2-30	#f2-26	#f2-29	#f2-28	#f2-32			#f2-

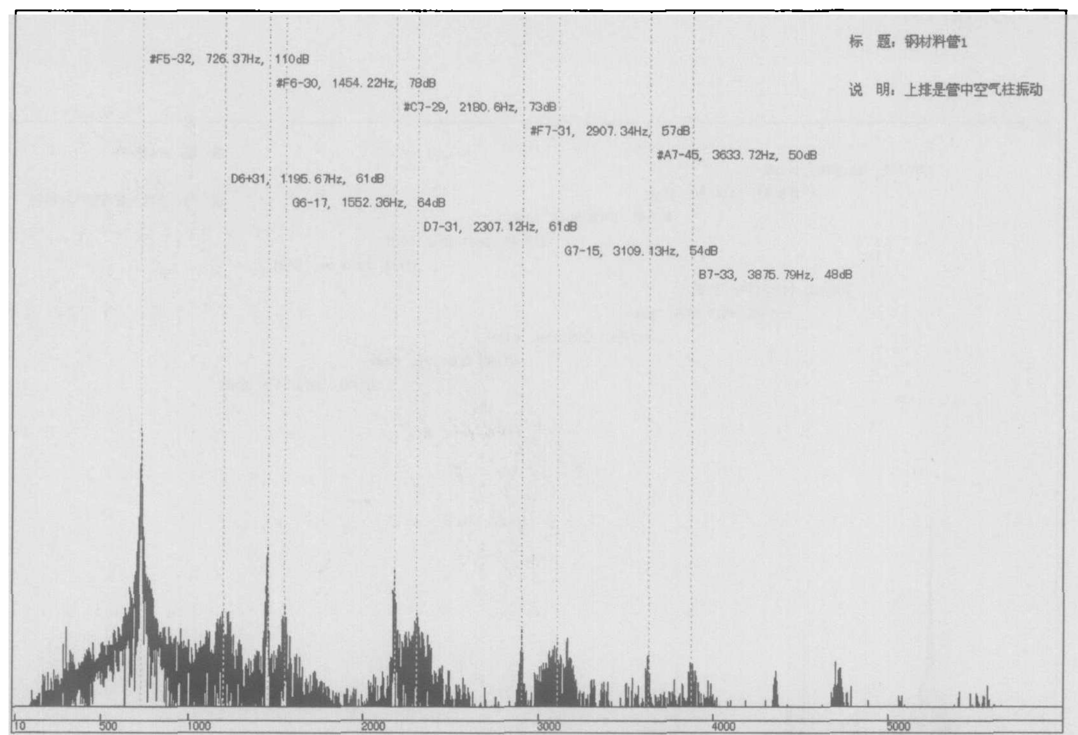
数据表中“□”中数据由于偏差太大被略去。音强采用计权 A 声级。

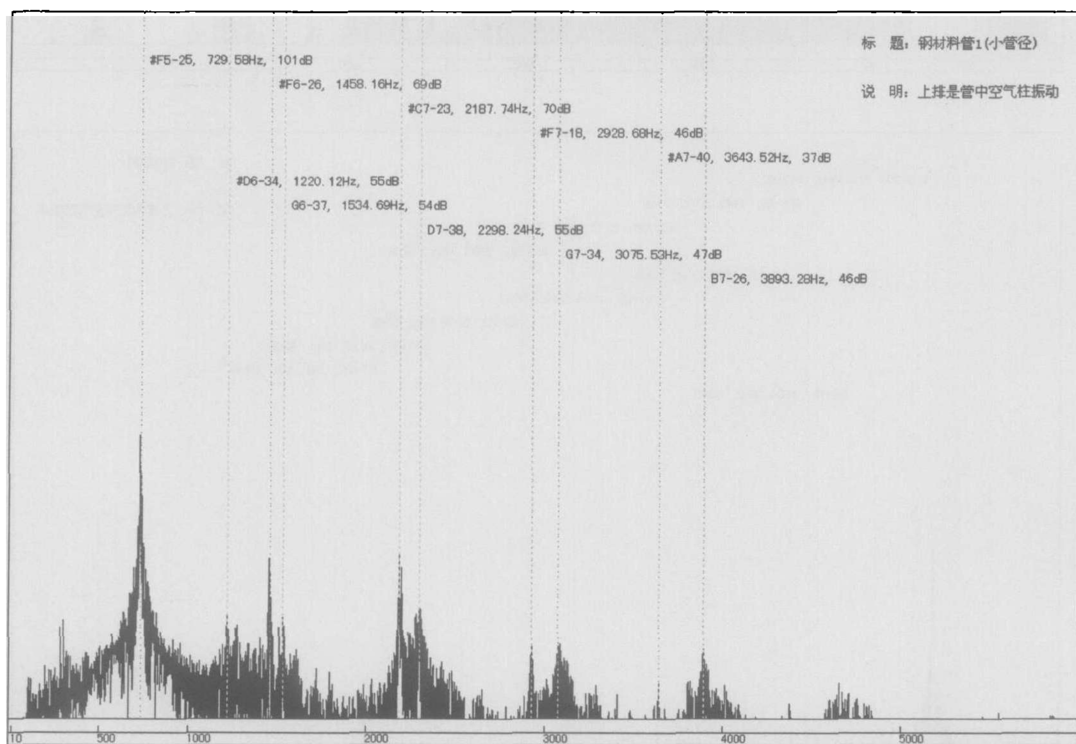
去除偏差的方法是将六组数据中的最大偏差数据和最小偏差数据不计入统计数据中，方差控制在 3.6 以下。

2、频谱图


标　题：PPR管材1
说　明：上排为管中空气柱振动
#F5-42, 722.35Hz, 116dB
#F6-42, 1444.7Hz, 86dB
#C7-41, 2165.31Hz, 77dB
#F7-43, 2887.75Hz, 58dB
A7+44, 3610.1Hz, 56dB
#C6+50, 1141.11Hz, 65dB
G6-45, 1527.64Hz, 68dB
#C7+51, 2283.32Hz, 64dB
G7-48, 3050.9Hz, 62dB
B7-36, 3870.84Hz, 50dB
10
500
1000
2000
3000
4000
5000


标　题：PPR管材2
说　明：上排为管中空气柱振动
#F5-37, 724.36Hz, 112dB
#F6-36, 1449.27Hz, 71dB
#C7-35, 2173.27Hz, 70dB
#F7-36, 2898.74Hz, 53dB
G6-43, 1529.11Hz, 62dB
D7-36, 2300.53Hz, 55dB
G7-33, 3076.9Hz, 55dB
A7+50, 3622.19Hz, 48dB
B7-31, 3881.1Hz, 51dB
D6+15, 1184.69Hz, 60dB
10
500
1000
2000
3000
4000
5000


标　题：钢材料管1
说　明：上排是管中空气柱振动
#F5-32, 726.37Hz, 110dB
#F6-30, 1454.22Hz, 78dB
#C7-29, 2180.6Hz, 73dB
#F7-31, 2907.34Hz, 57dB
#A7-45, 3633.72Hz, 50dB
D6+31, 1195.67Hz, 61dB
G6-17, 1552.36Hz, 64dB
D7-31, 2307.12Hz, 61dB
G7-15, 3109.13Hz, 54dB
B7-33, 3875.79Hz, 48dB
10
500
1000
2000
3000
4000
5000


标　题：钢材料管1(小管径)
说　明：上排是管中空气柱振动
#F5-25, 729.58Hz, 101dB
#F6-26, 1458.16Hz, 69dB
#C7-23, 2187.74Hz, 70dB
#F7-18, 2928.68Hz, 46dB
#A7-40, 3643.52Hz, 37dB
#D6-34, 1220.12Hz, 55dB
G6-37, 1534.69Hz, 54dB
D7-38, 2298.24Hz, 55dB
G7-34, 3075.53Hz, 47dB
B7-26, 3893.28Hz, 46dB
10
500
1000
2000
3000
4000
5000

附录三 复原骨笛测音报告

测音实验目的：以客观的实验方法，测定并了解舞阳贾湖骨笛复原品的音响属性。

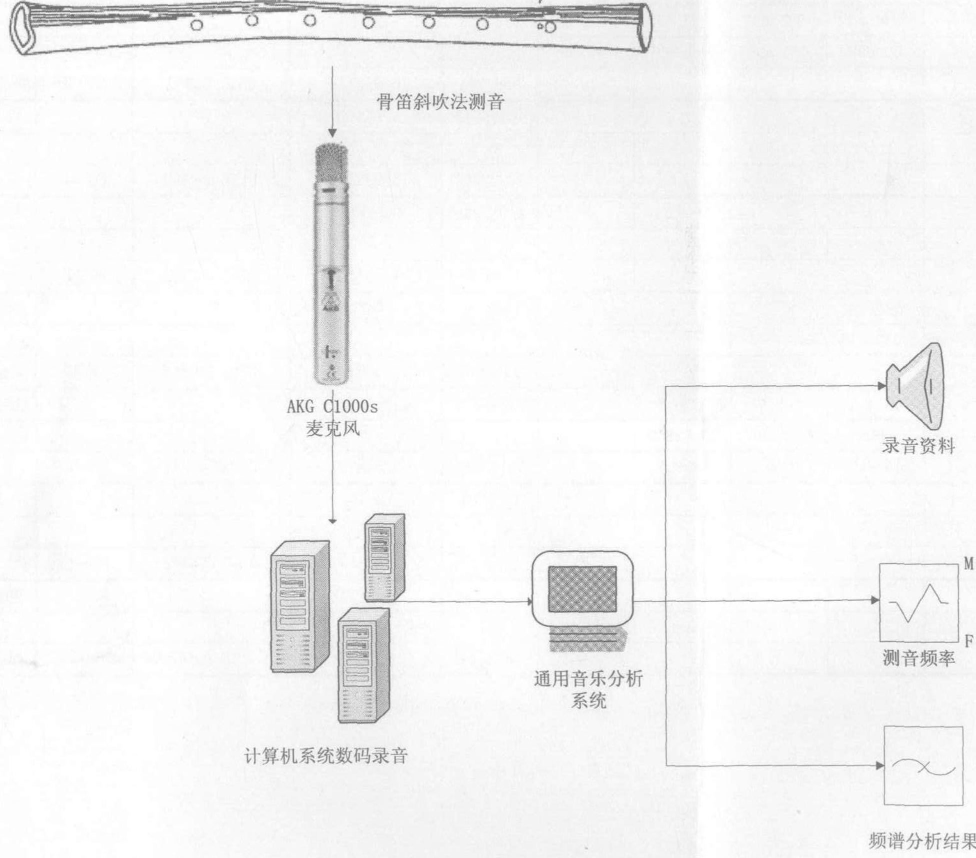
测音实验设备：计算机测音系统（硬件环境：CPU Intel P4、512M 内存、Creative Soundblaster Live5.1 声卡；操作系统为 Microsoft Windows XP；软件包括 Adobe Audition 2.0、Steinberg Nuendo 3、通用音乐检测系统 GMS）、测音麦克风 AKG C1000s。

测音实验方法：斜吹法吹奏骨笛，上下行连续测音。各音位间，重复 6~15 次，每次之间将骨笛拿下，空出一定的时间间隔。用计算机音频软件录制复原骨笛的音响，用软件频谱分析功能，测定舞阳贾湖骨笛各音孔基音、频谱、和声强。

测音人员：孙毅（操作、录制、分析）、韩宝强（监测、指导）。

测音环境：温度 20°C、相对湿度 40%、10 平米测音室、混响时间 0.3 秒。

测音流程框图：



M253:4 骨笛复原品测音数据记录和分析（上行）

上行	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均值	标准偏差	标准音音分数	音名	音程
筒音	682.1	678.04	696.87	704.69	702.34	711.57	724.97	719.72	708.98	711.07	721	718.86	715.54			707.3654	11.19799			
与平均差值	-25.2654	-29.3254	-10.4954	-2.67538	-5.02538	4.204615	17.60462	12.35462	1.614615	3.704615	13.63462	11.49462	8.174615							
筛选后数据						711.57	724.97	719.72			721	718.86	715.54			718.61	3.37	849.2464334	F5+49	
8孔	862.25	849.59	863.1	865.82	862.28	844.86	869.23	875.18	876.36	834.75	868.4	872.55				862.0308	9.482083			333.4665
与平均差值	0.219167	-12.4408	1.069167	3.789167	0.249167	-17.1708	7.199167	13.14917	14.32917	-27.2808	6.369167	10.51917								
筛选后数据				865.82			869.23	875.18	876.36		868.4	872.55				871.2567	3.44	1182.712908	A5-18	
7孔	940.43	947.12	933	934.6	954.59	961.31	959.83	943.16	953.14	954.44	972.1	944.24	927.63	927.55	920.93	944.938	11.72853			166.5438
与平均差值	-4.508	2.182	-11.938	-10.338	9.652	16.372	14.892	-1.778	8.202	9.502	27.162	-0.698	-17.308	-17.388	-24.008					
筛选后数据					954.59	961.31	959.83		953.14	954.44	972.1					959.235	5.178333	1349.25669	#A5+49	
6孔	1011.7	1017.1	1011.8	1015.8	1027.2	1019.1	1025.8	1029.2								1019.713	5.765625			110.3478
与平均差值	-8.0125	-2.6125	-7.9125	-3.9125	7.4875	-0.6125	6.0875	9.4875												
筛选后数据		1017.1		1015.8	1027.2	1019.1	1025.8	1029.2								1022.367	5.033333	1459.604469	C6-41	
5孔	1104.6	1113.2	1111.9	1112.1	1111.8	1106.7	1101.2	1110								1108.938	3.578125			143.8574
与平均差值	-4.3375	4.2625	2.9625	3.1625	2.8625	-2.2375	-7.7375	1.0625												
筛选后数据		1113.2	1111.9	1112.1	1111.8	1106.7		1110								1110.95	1.733333	1603.461863	#C6+3	
4孔	1200.2	1200.1	1209.7	1202.3	1200.2	1199.6	1212.9	1206.8	1205	1193.3						1203.01	4.472			142.3385
与平均差值	-2.81	-2.91	6.69	-0.71	-2.81	-3.41	9.89	3.79	1.99	-9.71										
筛选后数据			1209.7	1202.3	1200.2		1212.9	1206.8	1205							1206.15	3.65	1745.800376	D6+45	
3孔	1263.5	1277	1295.8	1288.1	1300.1	1305.8	1314.4	1305.8	1320.4	1322	1314.4	1314.6	1322	1320.1		1304.571	14.05102			154.7329
与平均差值	-41.0714	-27.5714	-8.77143	-16.4714	-4.47143	1.228571	9.828571	1.228571	15.82857	17.42857	9.828571	10.02857	17.42857	15.52857						
筛选后数据									1320.4	1322	1314.4	1314.6	1322	1320.1		1318.917	2.944444	1900.533241	E6-1	
2孔	1469.3	1461.8	1474	1465.3	1464	1455.9	1466	1476	1466.7	1457.1						1465.61	4.79			187.2252
与平均差值	3.69	-3.81	8.39	-0.31	-1.61	-9.71	0.39	10.39	1.09	-8.51										
筛选后数据	1469.3		1474	1465.3			1466	1476	1466.7							1469.55	3.633333	2087.758447	#F6-14	
1孔	1655	1647.6	1462.9	1655.1	1656.3	1653	1651.1	1648.9								1628.738	41.45937			203.8991
与平均差值	26.2625	18.8625	-165.838	26.3625	27.5625	24.2625	22.3625	20.1625												
筛选后数据	1655			1655.1	1656.3	1653	1651.1	1648.9								1653.233	2.233333	2291.657504	#G6-10	

M253:4 骨笛复原品测音数据记录和分析（下行）

下行	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均值	标准偏差	标准音音分数	音名	音程
筒音	716.35	702.86	710.94	710.18	711.73	706.97	717.04									710.8671	3.597551			
与平均差值	5.482857	-8.00714	0.072857	-0.68714	0.862857	-3.89714	6.172857													
筛选后数据	716.35		710.94	710.18	711.73	706.97	717.04									712.2017	2.995556	833.7385964	F5+34	
8孔	826.04	811.2	809.87	825.33	820.5	854.95	839.57	854.37	849.73	847.39						833.895	15.307			296.6984
与平均差值	-7.855	-22.695	-24.025	-8.565	-13.395	21.055	5.675	20.475	15.835	13.495										
筛选后数据	826.04					854.95	839.57	854.37	849.73	847.39						845.3417	8.357778	1130.437043	#C5+31	
7孔	924.3	923.41	921.47	916.2	923.72	924.97	924.21									922.6114	2.157959			153.4303
与平均差值	1.688571	0.798571	-1.14143	-6.41143	1.108571	2.358571	1.598571													
筛选后数据	924.3	923.41	921.47		923.72	924.97	924.21									923.68	0.826667	1283.867298	#A5-16	
6孔	1018.5	1015.6	1030.6	1023.3	1013.2	1021.8										1020.5	4.733333			172.5733
与平均差值	-2	-4.9	10.1	2.8	-7.3	1.3														
筛选后数据	1018.5	1015.6	1030.6	1023.3	1013.2	1021.8										1020.5	4.733333	1456.440643	C6-43	
5孔	1094.5	1097.1	1092.5	1096.5	1096.5	1091.9										1094.833	1.866667			121.7221
与平均差值	-0.33333	2.266667	-2.33333	1.666667	1.666667	-2.93333														
筛选后数据	1094.5	1097.1	1092.5	1096.5	1096.5	1091.9										1094.833	1.866667	1578.162721	#C6-21	
4孔	1188.7	1205.6	1207.5	1202.2	1203.4	1207.6	1213.8									1204.114	5.155102			168.403
与平均差值	-15.4143	1.485714	3.385714	-1.91429	-0.71429	3.485714	9.685714													
筛选后数据		1205.6	1207.5	1202.2	1203.4	1207.6	1213.8									1206.683	2.95	1746.56572	D6+47	
3孔	1321.2	1292.6	1293.6	1323.3	1306.2	1316.5	1305.8	1321.3	1311.8	1303.7	1304.5	1322	1301.8	1315.1		1309.957	8.785714			155.2578
与平均差值	11.24286	-17.3571	-16.3571	13.34286	-3.75714	6.542857	-4.15714	11.34286	1.842857	-6.25714	-5.45714	12.04286	-8.15714	5.142857						
筛选后数据	1321.2			1323.3		1316.5		1321.3				1322		1315.1		1319.9	2.733333	1901.823501	E6+2	
2孔	1439	1386.6	1451.6	1467.9	1473.3	1469.9	1457.2	1461.8	1472.6							1453.322	18.39259			183.0659
与平均差值	-14.3222	-66.7222	-1.72222	14.57778	19.97778	16.57778	3.877778	8.477778	19.27778											
筛选后数据				1467.9	1473.3	1469.9	1457.2	1461.8	1472.6							1467.117	5.077778	2084.889432	#F6-15	
1孔	1663.8	1669.9	1676.6	1660.4	1657.1	1641.6	1674.3									1663.386	8.873469			221.1419
与平均差值	0.414286	6.514286	13.21429	-2.98571	-6.28571	-21.7857	10.91429													
筛选后数据	1663.8	1669.9	1676.6	1660.4	1657.1		1674.3									1667.017	6.583333	2306.031306	#G6+6	

M282:20骨笛复原品堵小七孔测音数据记录和分析（上行）

上行	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均值	标准偏差	标准音音分数	音名	音程
筒音	684.57	690.12	688.66	685.39	683.41	687.42	685.39	686.13	703.04	702.72	707.61	711.63	704.21	704.17	703	695.1647	9.363644			
与平均差值	-10.5947	-5.04467	-6.50467	-9.77467	-11.7547	-7.74467	-9.77467	-9.03467	7.875333	7.555333	12.44533	16.46533	9.045333	9.005333	7.835333					
筛选后数据									703.04	702.72	707.61	711.63	704.21	704.17	703	705.1971	2.527347	816.6276	F5+17	
7孔	799.59	792.35	791.64	794.64	794.47	802.38	804.51	803.65	804.46	818.55	803.23	804.38				801.1542	5.513472			230.1896
与平均差值	-1.56417	-8.80417	-9.51417	-6.51417	-6.68417	1.225833	3.355833	2.495833	3.305833	17.39583	2.075833	3.225833								
筛选后数据	799.59						804.51	803.65	804.46	818.55	803.23	804.38				805.4814	3.733878	1046.817	G5+47	
6孔	903.34	901.92	899.33	899.31	907.43	905.46	909.45	920.79								905.8788	5.008437			207.5331
与平均差值	-2.53875	-3.95875	-6.54875	-6.56875	1.55125	-0.41875	3.57125	14.91125												
筛选后数据	903.34	901.92			907.43	905.46	909.45	920.79								908.065	4.703333	1254.35	#A5-46	
5孔	982.01	977.34	978.82	981.54	976.77	976.71	992.91	988.01	1006.4	998.28	1004.3	998.4	998.25			989.2108	9.734675			166.5377
与平均差值	-7.20077	-11.8708	-10.3908	-7.67077	-12.4408	-12.5008	3.699231	-1.20077	17.18923	9.069231	15.08923	9.189231	9.039231							
筛选后数据							992.91		1006.4	998.28	1004.3	998.4	998.25			999.7567	3.728889	1420.888	B5+21	
4孔	1111.2	1108.8	1108.6	1110.7	1101.9	1113.2	1126.1	1126.7	1143.1	1147.6	1128.1	1133.5	1134.2			1122.592	12.48521			220.4653
与平均差值	-11.3923	-13.7923	-13.9923	-11.8923	-20.6923	-9.39231	3.507692	4.107692	20.50769	25.00769	5.507692	10.90769	11.60769							
筛选后数据								1126.7	1143.1	1147.6	1128.1	1133.5	1134.2			1135.533	6.544444	1641.353	#C6+41	
3孔	1235.2	1227.9	1235.3	1233.8	1241.9	1264.6	1265.6	1262.9	1267.3	1259.9	1267.5	1267.6	1266.7			1253.554	14.41065			189.0407
与平均差值	-18.3538	-25.6538	-18.2538	-19.7538	-11.6538	11.04615	12.04615	9.346154	13.74615	6.346154	13.94615	14.04615	13.14615							
筛选后数据						1264.6	1265.6		1267.3		1267.5	1267.6	1266.7			1266.55	0.966667	1830.394	#D6+30	
2孔	1385.1	1408.7	1435.6	1447.6	1461.1	1480.8	1462.5	1463.3								1443.088	24.96563			244.2778
与平均差值	-57.9875	-34.3875	-7.4875	4.5125	18.0125	37.7125	19.4125	20.2125												
筛选后数据			1435.6	1447.6	1461.1	1480.8	1462.5	1463.3								1458.483	11.25556	2074.672	#F6-25	
1孔	1656.4	1723.7	1754.6	1772.1	1786.3	1778.9	1792.1	1795	1793.5							1761.4	33.22222			351.0227
与平均差值	-105	-37.7	-6.8	10.7	24.9	17.5	30.7	33.6	32.1											
筛选后数据				1772.1	1786.3	1778.9	1792.1	1795	1793.5							1786.317	7.216667	2425.694	A6+26	

M282:20 骨笛复原品堵小七孔测音数据记录和分析（下行）

下行	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均值	标准偏差	标准音音分数	音名	音程
筒音	693.44	690.8	708.31	713.68	713.56	709.51	710.9	708.33	712.85							706.82	6.533333			
与平均差值	-13.38	-16.02	1.49	6.86	6.74	2.69	4.08	1.51	6.03											
筛选后数据				713.68	713.56	709.51	710.9	708.33	712.85							711.4717	1.891667	831.9632	F5+33	
7孔	797.09	800.39	806.34	810.52	802.49	795.82	794.93	801.81								801.1738	4.11625			209.7423
与平均差值	-4.08375	-0.78375	5.16625	9.34625	1.31625	-5.35375	-6.24375	0.63625												
筛选后数据	797.09	800.39	806.34	810.52	802.49			801.81								803.1067	3.548889	1041.706	G5+42	
6孔	885.19	881.78	886.87	886.43	868.91	886.87										882.675	4.886667			163.5488
与平均差值	2.515	-0.895	4.195	3.755	-13.765	4.195														
筛选后数据	885.19	881.78	886.87	886.43	868.91	886.87										882.675	4.886667	1205.254	A5+5	
5孔	987.54	992.26	997.63	993.52	1011.1	998.98	1010.4	1004.3								999.4663	6.850313			220.6452
与平均差值	-11.9263	-7.20625	-1.83625	-5.94625	11.63375	-0.48625	10.93375	4.83375												
筛选后数据			997.63	993.52	1011.1	998.98	1010.4	1004.3								1002.655	5.945	1425.9	B5+26	
4孔	1121.4	1106.7	1099.1	1103.9	1094.5	1104.6	1113.9									1106.3	6.6			173.3757
与平均差值	15.1	0.4	-7.2	-2.4	-11.8	-1.7	7.6													
筛选后数据	1121.4	1106.7	1099.1	1103.9		1104.6	1113.9									1108.267	6.255556	1599.275	#C6-1	
3孔	1224.9	1227.1	1238.5	1248	1225.6	1239.9	1234.5	1261.4	1261.4	1262	1269.5	1274	1272.2			1249.154	16.2426			231.3921
与平均差值	-24.2538	-22.0538	-10.6538	-1.15385	-23.5538	-9.25385	-14.6538	12.24615	12.24615	12.84615	20.34615	24.84615	23.04615							
筛选后数据								1261.4	1261.4	1262	1269.5	1274	1272.2			1266.75	5.15	1830.667	#D6+31	
2孔	1476.7	1488	1487	1487.3	1487.7	1492.2	1480	1478.8	1474.8	1495.4	1490.2	1491	1492.1			1486.246	4.659375			282.7392
与平均差值	-9.54615	1.753846	0.753846	1.053846	1.453846	5.953846	-6.24615	-7.44615	-11.4462	9.153846	3.953846	4.753846	5.853846							
筛选后数据		1488				1492.2				1495.4	1490.2	1491	1492.1			1491.483	2.1	2113.407	#F6+13	
1孔	1799	1801	1790.3	1798.4	1763.4	1772.1										1787.367	13.07778			313.3053
与平均差值	11.63333	13.63333	2.933333	11.03333	-23.9667	-15.2667	-1787.37	-1787.37	-1787.37											
筛选后数据	1799	1801	1790.3	1798.4	1763.4	1772.1										1787.367	13.07778	2426.712	A6+27	

M282:20 骨笛复原品开小七孔测音数据记录和分析（上行）

上行	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均值	标准偏差	标准音音分数	音名	音程
筒音	726.16	723.02	721.8	732.4	720.95	724.35	733.09	730.46	725.77	721.22	714.16	725	714.8			724.0908	4.399172			
与平均差值	2.069231	-1.07077	-2.29077	8.309231	-3.14077	0.259231	8.999231	6.369231	1.679231	-2.87077	-9.93077	0.909231	-9.29077							
筛选后数据	726.16			732.4			733.09	730.46	725.77			725				728.8133	3.17	873.6548	#F5-26	
7孔	795.01	799.09	783.61	788.23	806.5	796.35	793.15	792.39	802.49	811.18	817.33	799.87	797.8	798.4	813.8	799.68	7.078667			179.6987
与平均差值	-4.67	-0.59	-16.07	-11.45	6.82	-3.33	-6.53	-7.29	2.81	11.5	17.65	0.19	-1.88	-1.28	14.12					
筛选后数据					806.5				802.49	811.18	817.33	799.87			813.8	808.5283	5.4248	1053.354	#G5-46	
6孔	889.91	880.37	884.54	889.17	905.55	875.82	873.06	891.34	869.08	875.22	892.55	886.06	892.09			884.9815	7.969112			170.8346
与平均差值	4.928462	-4.61154	-0.44154	4.188462	20.56846	-9.16154	-11.9215	6.358462	-15.9015	-9.76154	7.568462	1.078462	7.108462							
筛选后数据	889.91			889.17	905.55			891.34			892.55	886.06	892.09			892.3814	5.77875	1224.188	A5+25	
5孔	997.38	984.23	971.97	973.36	965.36	957.41	970.71	974.69	977.93	973.46	979.57	991.31	989.28	977.39		977.4321	7.872449			173.795
与平均差值	19.94786	6.797857	-5.46214	-4.07214	-12.0721	-20.0221	-6.72214	-2.74214	0.497857	-3.97214	2.137857	13.87786	11.84786	-0.04214						
筛选后数据	997.38	984.23							977.93		979.57	991.31	989.28			986.6167	6.04	1397.983	B5-1	
4孔	1101.3	1101.3	1111.3	1116	1099.2	1094.5	1091.1	1107.9	1099.1	1112.7	1121.4	1087				1103.567	8.577778			206.7509
与平均差值	-2.26667	-2.26667	7.733333	12.43333	-4.36667	-9.06667	-12.4667	4.333333	-4.46667	9.133333	17.83333	-16.5667								
筛选后数据		1101.3	1111.3	1116				1107.9		1112.7	1121.4					1111.767	4.933333	1604.734	#C6+6	
3孔	1210.7	1208.9	1203.5	1231	1234.5	1229.8	1209.6	1200	1206.3	1202.1	1239.2					1215.964	12.84463			169.0435
与平均差值	-5.26364	-7.06364	-12.4636	15.03636	18.53636	13.83636	-6.36364	-15.9636	-9.66364	-13.8636	23.23636									
筛选后数据	1210.7			1231	1234.5	1229.8	1209.6				1239.2					1225.8	10.43333	1773.777	#D6-25	
2孔	1489.4	1486.8	1472.6	1485.3	1461.9	1484.6	1484.8	1478	1483.5	1467.4	1494.4	1451.9	1485.5	1477.3	1489.4	1479.52	9.069333			334.2619
与平均差值	9.88	7.28	-6.92	5.78	-17.62	5.08	5.28	-1.52	3.98	-12.12	14.88	-27.62	5.98	-2.22	9.88					
筛选后数据	1489.4	1486.8		1485.3			1484.8						1485.5		1489.4	1486.867	1.525	2108.039	F6+9	
1孔	1805.8	1805.8	1805.8	1807.8	1807.8	1800.5	1806.4	1807.1	1807							1806	1.355556			337.5694
与平均差值	-0.2	-0.2	-0.2	1.8	1.8	-5.5	0.4	1.1	1											
筛选后数据			1805.8	1807.8	1807.8		1806.4	1807.1	1807							1806.983	0.588889	2445.609	#G6+46	

M282:20 骨笛复原品开小七孔测音数据记录和分析（下行）

下行	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均值	标准偏差	标准音音分数	音名	音程
筒音	724.29	707.48	720.34	715.75	722.93	733.03	733.8	736.38	733.1							725.2333	7.861481			
与平均差值	-0.94333	-17.7533	-4.89333	-9.48333	-2.30333	7.796667	8.566667	11.14667	7.866667											
筛选后数据	724.29				722.93	733.03	733.8	736.38	733.1							730.5883	4.652222	877.8661	#F5-22	
7孔	817.99	812.53	803.71	804.39	801.07	803.85	809.17	809.94	803.77							807.38	4.468889			177.8769
与平均差值	10.61	5.15	-3.67	-2.99	-6.31	-3.53	1.79	2.56	-3.61											
筛选后数据	817.99	812.53		804.39		803.85	809.17	809.94								809.645	3.841667	1055.743	#G5-43	
6孔	895.87	902.04	903.42	898.64	905.37	899.99	906.74	901.49	918.99							903.6167	4.5			195.3186
与平均差值	-7.74667	-1.57667	-0.19667	-4.97667	1.753333	-3.62667	3.123333	-2.12667	15.37333											
筛选后数据		902.04	903.42		905.37		906.74	901.49	918.99							906.3417	4.348889	1251.062	#A5-48	
5孔	994.83	992.3	996.19	995.48	995.43	999.44	1013.1	996.7	992.89	998.82						997.518	3.7612			170.1698
与平均差值	-2.688	-5.218	-1.328	-2.038	-2.088	1.922	15.582	-0.818	-4.628	1.302										
筛选后数据			996.19	995.48		999.44	1013.1	996.7		998.82						999.955	4.381667	1421.231	B5+22	
4孔	1126.6	1125.5	1120	1118.7	1116.6	1114.7	1121.4	1116.7	1116	1108.6	1103.9					1117.155	4.804959			198.5677
与平均差值	9.445455	8.345455	2.845455	1.545455	-0.55455	-2.45455	4.245455	-0.45455	-1.15455	-8.55455	-13.2545									
筛选后数据	1126.6	1125.5	1120	1118.7			1121.4	1116.7								1121.483	3.044444	1619.799	#C6+21	
3孔	1276.1	1261.3	1254.1	1249.9	1232.4	1269.5	1276.7	1264	1253.3	1258.1	1273.7	1276.9				1262.167	10.65			219.1397
与平均差值	13.93333	-0.86667	-8.06667	-12.2667	-29.7667	7.333333	14.53333	1.833333	-8.86667	-4.06667	11.53333	14.73333								
筛选后数据	1276.1					1269.5	1276.7	1264			1273.7	1276.9				1272.817	4.044444	1838.939	#D6+40	
2孔	1482.1	1486.1	1480.7	1480.2	1484.7	1476.6	1470	1486.1								1480.813	3.9375			264.9623
与平均差值	1.2875	5.2875	-0.1125	-0.6125	3.8875	-4.2125	-10.8125	5.2875												
筛选后数据	1482.1	1486.1	1480.7	1480.2	1484.7			1486.1								1483.317	2.316667	2103.901	F6+5	
1孔	1748.5	1750.5	1762.1	1750.5	1784.9	1783.6	1796.4	1789.6	1805	1799.8	1787	1787.7				1778.8	17.26667			329.4651
与平均差值	-30.3	-28.3	-16.7	-28.3	6.1	4.8	17.6	10.8	26.2	21	8.2	8.9								
筛选后数据							1796.4	1789.6	1805	1799.8	1787	1787.7				1794.25	6.15	2433.366	#G6+33	

致谢

在毕业论文即将完成之际，回首三年的学习生活，心中感慨万千，强烈的感激之情油然而生。可以说，没有各位老师和同学的帮助和支持，我不可能顺利完成硕士的学习。

在这里首先要提到我的恩师，中国艺术研究院音乐研究所的韩宝强教授。韩老师待人和蔼，思路敏捷，语言诙谐。他在学业上监督指导我，生活上关心爱护我，为人上教育影响我。跟韩老师一起的日日夜夜，我总是能在愉快的气氛中，不知不觉地开拓思路，学到新的知识。特别是韩老师对学生的栽培爱护之情令我由衷的感谢与敬佩。

还要特别感谢的是中国艺术研究院音乐研究所王子初教授。王老师不仅在学术上给予我极大的帮助，而且为我的研究提供了设备工具方面的支持。

作为我的良师益友，非常感谢中央音乐学院的李玫老师对论文提出了大量宝贵意见。

此外，还要感谢中国艺术研究院的张振涛老师、萧兴华老师、项阳老师、顾伯宝工程师、清华大学的史清宇和赵海燕两位老师和王雪梅博士后、中国科学院动物研究所徐延恭先生、沈阳野生动物园兽医院领导和张玲女士传道授业之情。同时我还要感谢朱汉城教授、刘一青老师、赵文娟老师、曹明申工程师、宁保生先生、赵伯南同学对我在其他各个方面的指导和帮助。我还要感谢周媛、陈崧、李信昭、石林、张蕾、李卫、吴凡、刘蓓等同窗挚友的帮助。

感谢我的家人对我一如既往的支持和帮助，感谢我父母养育教导之恩，感谢我的爱人高洁在生活和学习方面的悉心照顾。

在这里真诚向所有帮助关心我的人再次说声：谢谢！